

# **Optimierung der Bahnübergangssicherung für bedarfsgesteuerte Schranken**

Von der Fakultät für Maschinenbau  
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig  
zur Erlangung der Würde  
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte Dissertation

von: Markus Pelz

aus: Berlin

eingereicht am: 12.08.2011

mündliche Prüfung am: 15.12.2011

Referenten: Professor Dr.-Ing. Karsten Lemmer und Professor Dr.-Ing. Jörn Pacht

# **Berichte aus dem DLR-Institut für Verkehrssystemtechnik**

## **Band 17**

### **Optimierung der Bahnübergangssicherung für bedarfsgesteuerte Schranken**

**Markus Pelz**

**Herausgeber:**

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.  
Institut für Verkehrssystemtechnik  
Lilienthalplatz 7, 38108 Braunschweig

**ISSN 1866-721X**

DLR-TS 1.17

Braunschweig, im April 2012

Institutsdirektor:  
Prof. Dr.-Ing. Karsten Lemmer

Verfasser:  
Markus Pelz



# Vorwort des Herausgebers

Liebe Leserinnen und Leser,

In Ihren Händen halten Sie einen Band unserer Buchreihe „Berichte aus dem DLR-Institut für Verkehrssystemtechnik“. In dieser Reihe veröffentlichen wir spannende, wissenschaftliche Themen aus dem Institut für Verkehrssystemtechnik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) und aus seinem Umfeld. Einen Teil der Auflage stellen wir Bibliotheken und Fachbibliotheken für ihren Buchbestand zur Verfügung. Herausragende wissenschaftliche Arbeiten und Dissertationen finden hier ebenso Platz wie Projektberichte und Beiträge zu Tagungen in unserem Hause von verschiedenen Referenten aus Wirtschaft, Wissenschaft und Politik.

Mit dieser Veröffentlichungsreihe verfolgen wir das Ziel, einen weiteren Zugang zu wissenschaftlichen Arbeiten und Ergebnissen zu ermöglichen. Wir nutzen die Reihe auch als praktische Nachwuchsförderung durch die Publikation der wissenschaftlichen Ergebnisse von Dissertationen unserer Mitarbeiter und auch externer Doktoranden. Veröffentlichungen sind wichtige Meilensteine auf dem akademischen Berufsweg. Mit der Reihe „Berichte aus dem DLR-Institut für Verkehrssystemtechnik“ erweitern wir das Spektrum der möglichen Publikationen um einen Baustein. Darüber hinaus verstehen wir die Kommunikation unserer Forschungsthemen als Beitrag zur nationalen und internationalen Forschungslandschaft auf den Gebieten Automotive, Bahnsysteme und Verkehrsmanagement.

Die vorliegende Dissertation unserer Buchreihe stellt eine automatisierte Lösung unter Nutzung einer kostengünstigen optischen Technologie für bedarfsgesteuerte Schranken vor. Unter Berücksichtigung betrieblicher, sicherungstechnischer und wirtschaftlicher Kriterien wird ein Ablösekonzept für Bahnübergangssicherungsanlagen nach dem Anrufschrakenprinzip beschrieben. Darüber hinaus wird eine zukunftsweisende Methode zur stetigen Verbesserung der Bahnübergangssicherung vorgestellt. Die Ausarbeitung bietet somit gleichermaßen ein erfolgsversprechendes betrieblich-wirtschaftlich optimiertes Konzept zur Ablösung von Anrufschraken und eine neue Methodik zur Auswahl und Bewertung von Konzepten zur Bahnübergangssicherung und leistet damit einen wertvollen Beitrag für einen effizienten Bahnbetrieb.

Prof. Dr.-Ing. Karsten Lemmer





# Vorwort des Autors

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Verkehrssystemtechnik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. in Braunschweig.

Mein erster Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Karsten Lemmer, der als Doktorvater diese Arbeit betreute, für spannende, interessante und abwechslungsreiche Aufgaben am Institut und vor allem für die Möglichkeit das Forschungsthema Bahnübergangssicherung im DLR aufbauen und etablieren zu können.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Jörn Pachl, dem Leiter des Instituts für Eisenbahnwesen und Verkehrssicherung an der TU Braunschweig, danke ich für sein Interesse an meinen Forschungsaktivitäten und die Übernahme des Koreferats.

Mein Dank gilt außerdem Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. mult. Eckehard Schnieder, Leiter des Instituts für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik an der TU Braunschweig, für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Weiterhin danke ich Herrn Heinz Laumen (Scheidt & Bachmann GmbH) und Herrn Hartwig Asbrock (DB Netz AG) für den fachlichen Austausch zum Thema meiner Dissertation.

Stellvertretend für meine Kollegen des DLR außerhalb des Instituts für Verkehrssystemtechnik möchte ich Herrn Dr. Anko Börner (Institut für Robotik und Mechatronik) danken. Seine Leistungen im Bereich optischer Systeme waren meine Inspiration für das Technologiekonzept.

Mein weiterer Dank gilt meinen Kolleginnen und Kollegen am Institut für Verkehrssystemtechnik des DLR sowie meinen Studenten für die sehr schöne gemeinsame Zeit und für alle gewonnenen Erfahrungen und Erkenntnisse.

Meinen Freunden in nah und fern danke ich für die redaktionelle Unterstützung und den erforderlichen Ausgleich abseits des Rechners.

Ohne die grenzenlose und uneingeschränkte Unterstützung meiner Eltern könnte ich jedoch nicht in der Position sein in der ich jetzt glücklicherweise bin. Sie waren immer für mich da und haben gemeinsam mit meiner Schwester meine Stärken aufgebaut und gefestigt, die ich während des Studiums, während meiner Dissertation und in manchen Lebenssituationen dringend gebraucht habe.

Mein letzter Dank gilt meiner Hauptstütze in den letzten Jahren, meiner Frau Franziska. Sie war zu jeder Zeit für mich da und hat mich im Rahmen meiner Dissertation stets aufmunternd begleitet und mich jederzeit mit voller Kraft unterstützt.

Markus Pelz



# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort des Herausgebers.....</b>	<b>iii</b>
<b>Vorwort des Autors .....</b>	<b>v</b>
<b>Kurzfassung.....</b>	<b>vii</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>ix</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Ziel und Nutzen der Arbeit.....	3
1.2 Derzeitiges Vorgehen bei der Auswahl geeigneter BÜSA.....	4
1.3 Aufbau der Arbeit .....	8
<b>2 Stand der Technik und Forschung im Kontext der BÜ-Sicherung.....</b>	<b>11</b>
2.1 Merkmale technischer Sicherung von Bahnübergängen .....	11
2.2 Bedarfsgesteuerte Bahnübergangssicherung .....	14
2.2.1 Anrufschränke.....	15
2.2.2 Internationale Beispiele .....	18
2.3 Hinderniserkennung im Gefahrenraum .....	18
<b>3 Methode zur Auswahl und Bewertung von BÜSA.....</b>	<b>23</b>
3.1 Idee: Systematisierung der Entscheidungsprozesse .....	23
3.2 Verwendung bekannter Instrumente .....	25
3.3 Leitfaden zur Bewertung der betrieblichen Eignung .....	30
3.4 Prozess zur Wahl einer Optimierungsstrategie.....	39
3.4.1 Bedarfsanalyseprozess .....	39
3.4.2 Optimierungsprozess .....	41
3.4.3 Bewertungsprozess.....	45
3.5 Ergebnis der Methodenentwicklung .....	47
<b>4 Ermittlung einer Optimierungsstrategie für Anrufschränken.....</b>	<b>51</b>
4.1 Optimierungsbedarf Anrufschränkenautomatisierung .....	51
4.1.1 Anforderungen für die Automatisierung der Anrufschränke .....	52
4.1.2 Analyse der Ausgangssituation .....	56
4.2 Identifikation des Optimierungspfades.....	58
4.2.1 Kostensenkungspotenziale im BÜSA-Zyklus.....	58

4.2.2	Bahnfremde Technologien für die Anrufschrakenautomatisierung .....	61
4.3	Schlussfolgerung .....	67
<b>5</b>	<b>Optimierte BÜ-Sicherung nach dem Anrufschrakenprinzip.....</b>	<b>71</b>
5.1	Betriebskonzept .....	71
5.2	Technologiekonzept .....	77
5.2.1	Komponenten der BÜ-Sicherung.....	77
5.2.2	Stereo-Kamera-System zur Hinderniserkennung .....	78
5.2.3	Detailexperimente mit der Stereo-Kamera .....	83
5.3	Sicherungskonzept .....	88
5.3.1	Logik der GFR für bedarfsgesteuerte Schranken .....	88
5.3.2	Logik der BÜ-Sicherung .....	94
5.3.3	Funktionsweise in der Rückfallebene.....	98
5.4	Weitere Einsatzbereiche für die optiBÜSA-Technologie .....	99
5.5	Zwischenfazit .....	100
<b>6</b>	<b>Fallstudie: Bewertung des Systemkonzepts .....</b>	<b>103</b>
6.1	Analyse der Systemsicherheit.....	103
6.2	Bewertung der betrieblichen Eignung .....	107
6.2.1	Einordnung von optiBÜSA in den BÜSA-Kontext .....	108
6.2.2	Wahl der optimalen BÜSA für einen Beispielbahnübergang .....	111
6.3	Nutzwertbasierte Analyse .....	114
6.4	Fazit.....	120
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>123</b>
	<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>127</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>133</b>
	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>137</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>139</b>
	<b>Anhang .....</b>	<b>151</b>
A.1	Glossar .....	151
A.2	Gesetze, Vorschriften und Richtlinien mit Bezug zur Bahnübergangssicherung .....	152
A.3	Anwendungshinweise für den BÜSA-Leitfaden .....	154

## Kurzfassung

Einige Bahnübergangssicherungsanlagen (BÜSA) haben das Ende ihrer Lebensdauer erreicht. Investitionen in neue Anlagen sind somit erforderlich. Bei der Erneuerung besteht die Chance, die Lebenszykluskosten (LCC: Life Cycle Costs) einer BÜSA signifikant zu senken. Dies kann durch Veränderungen in der Anlagenstruktur (Technologien, Übertragungswege, etc.) gelingen. Die Einführung neuer Systeme bedingt jedoch einen intensiven Forschungs- und Entwicklungsprozess bei dem am Anfang nicht klar ist, ob eine Kostensenkung erreicht wird. Einen weiteren, mitunter größeren Anteil der Investitionen, stellen Begleitkosten, wie das Projektengineering und der Straßenbau, dar. Durch eine geeignete Optimierung von Prozessen und innovative Sicherungsverfahren, mit denen Straßenbaumaßnahmen reduziert werden, sind vielversprechende Kostensenkungspotentiale vorhanden.

Der Bedarf an neuen BÜSA-Konzepten mit betrieblich geeigneter und wirtschaftlicher Sicherung ist hoch und wird in den kommenden Jahren weiter ansteigen. Ein dieses Spannungsfeld verdeutlichender Bereich zeigt das Sicherungsverfahren Anrufschränke auf. Mit der in dieser Arbeit vorgestellten automatisierten Lösung für bedarfsgesteuerte Schranken wird erstmals ein nach betrieblichen, sicherungstechnischen und wirtschaftlichen Kriterien optimiertes Ablösekonzept für Anrufschränke beschrieben.

Aufgrund der geringen Stückzahlen ist eine spezifische Technologieentwicklung allein für die etwa eintausend Anrufschränke in Deutschland eher ungeeignet. Komponenten aus der Industrieautomatisierung werden aufgrund ihrer hohen Stückzahlen zukünftig auch zur Senkung der LCC im Bahnbereich beitragen. Vor diesem Hintergrund wird ein Lösungsansatz auf Basis eines aus der Robotik stammenden Stereo-Kamera-Systems zur Automatisierung der Anrufschränkefunktionen verfolgt und eine Möglichkeit zur verfahrenssicheren Einbindung in den Bahnbetrieb aufgezeigt.

Heute spielen bei der Wahl der geeigneten Sicherung die LCC der Anlagen gegenüber funktionalen, betrieblichen und sicherungstechnischen Anforderungen eine untergeordnete Rolle. Das Ziel der Betreiber ist es jedoch, das betrieblich-wirtschaftliche Optimum zu ermitteln. Der Bedarf an geeigneten Bewertungsmethoden, die eine entsprechende Auswahl unterstützen würden, wird deshalb ansteigen. Insbesondere in den Prozessen der Planung und strategischer Entscheidungen zur Wahl einer geeigneten Optimierungsstrategie wird eine betrieblich-wirtschaftlich orientierte Methodik benötigt. Ein weiterer Schwerpunkt der Arbeit ist deshalb die Entwicklung einer Methode, die als Entscheidungshilfe für Bahnübergangsplaner und Anlagenmanager dient, mit welcher der Prozess der Planung und der Prozess zur Wahl hinsichtlich geeigneter Investitionsstrategien im Bereich von BÜSA systematisierbar werden.

Im Ergebnis liefert die Arbeit neben dem Konzept für ein neues Sicherungsverfahren eine Methode zur Auswahl und Bewertung von Konzepten zur Bahnübergangssicherung. Der Nutzen dieser Methode ist es, Verbesserungen für die Bahnübergangssicherung bereits in einer frühen Phase der Entwicklung bewerten zu können und dadurch die Kosten im weiteren Verlauf zu senken, wie am Beispiel zur Optimierung der Bahnübergangssicherung für bedarfsgesteuerte Schranken aufgezeigt wird.



# Abstract

Modernisation of Level Crossing Protection Systems is highly needed and provides the chance to reduce life cycle costs (LCC) and in particular purchasing costs of Level Crossing Protection Systems significantly. On the one hand this can be achieved through fundamental changes in the facility structure (technologies, transmission channels etc.). On the other hand this can be achieved by reducing costs of road construction and by means of improvement of relevant processes of the manufacturers as well as those of infrastructure managers.

The need of optimisation concerning new concepts, which have low LCC, produce operationally adequate and economical safety concepts or in some cases (e.g. technical danger zone supervision) can help to reduce costs, is high and will increase more in the next years. The replacement of the old technique of the on call barrier (German: Anrufschränke) clarifies this area of conflict. By introducing the automation concept for demand-driven Level Crossing Systems in this thesis, a replacement concept for the "Anrufschränke" is specified, which is optimised with respect to operational, safety specific as well as economic criteria.

The development of substitute technology only for replacing the "Anrufschränke" is rather inappropriate due to the limited number of only 1,000 "Anrufschränken" in Germany. Commercial-off-the-shelf (COTS) components will lead to a decrease of LCC in the railway system because of their high quantity. Having this in mind, an approach on basis of a stereo-camera-system is followed to automate the essential functions of the "Anrufschränke". By integrating a technology concept for obstacle detection which originally was used in robotics, the possibility of implementing the new safety concept according to the principle of the "Anrufschränke" is identified. The thesis provides adequate groundwork for a successful development and has the aim to show an appropriate way of migration for the replacement of the "Anrufschränke".

Traditionally, the operational and safety demands have to be fulfilled. Still, LCC only play a minor role during the planning and choice of an appropriate protection system. Because of this fact, the backlog of investment is supported indirectly. That is why it is the aim of the infrastructure managers to identify not only the operational, but also the operational-economic optimum of Level Crossing Protection Systems. Therefore, an adequate assessment method is needed, which facilitates an appropriate choice. An operational-economic orientated method for optimising Level Crossing Protection Systems will particularly be needed during the processes of strategic determination and operative planning. The method, which is introduced with this thesis, is a decision guidance for planners of Level Crossings and Infrastructure Managers. It helps to systematise the process of planning a Level Crossing Protection System and to systematise the decision making of appropriate optimisation strategies.

As a result, this thesis provides not only a concept of a new Level Crossing Protection System to replace the "Anrufschränke", but also a method for choosing and evaluating new concepts. The benefit of this method is to screen ideas for improvement of Level Crossing Protection Systems already in the conception phase. This is shown by the example of the automation of demand-driven Level Crossing Systems.



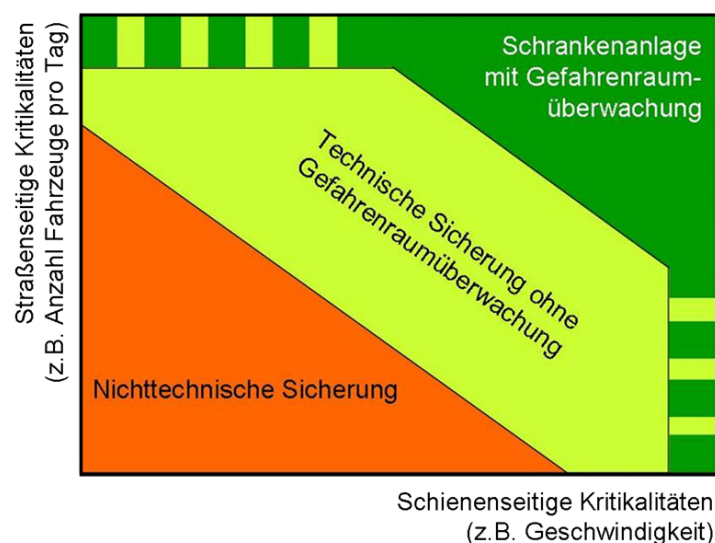


# 1 Einleitung

Das System Eisenbahn setzt sich primär aus der Infrastruktur und dem rollenden Gut - Triebfahrzeuge und Wagen - zusammen. Insbesondere im Bereich der Infrastruktur sehen sich die Betreiber einem enormen Spannungsfeld der Anforderungen ausgesetzt: einerseits müssen ihre Anlagen sicher und hochverfügbar gestaltet werden, um einen nachhaltigen und leistungsfähigen Schienenverkehr zu ermöglichen, andererseits muss die Wirtschaftlichkeit über den gesamten Lebenszyklus sichergestellt sein. Um in diesem Spannungsfeld als Bahnbetreiber betrieblich-wirtschaftlich bestmöglich aufgestellt zu sein, werden besonders hinsichtlich strategischer Investitionsentscheidungen Methoden zur Bewertung neuer Anlagenkonzepte an Bedeutung gewinnen (vgl. [Gut10], [Obr09]).

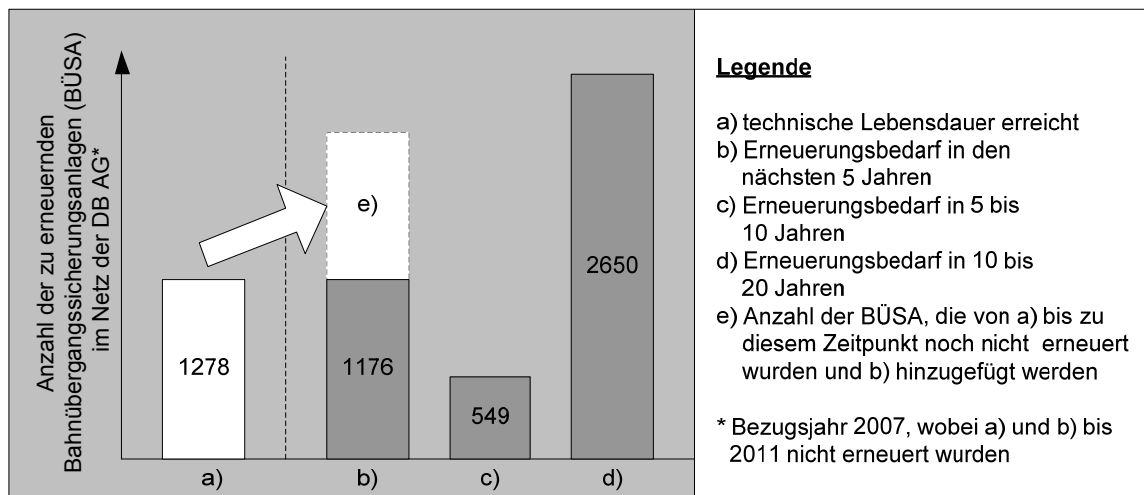
Im Bereich der Eisenbahnleit- und -sicherungstechnik (LST) - einem wesentlichen Bestandteil der Bahninfrastruktur - bedingt die Überalterung des Anlagenbestands in den kommenden Jahren umfangreiche Investitionsmaßnahmen. Jedoch hemmen die hohen Lebenszykluskosten (LCC: life cycle costs) der Anlagen die Bereitschaft der Betreiber erforderliche Investitionen flächendeckend umzusetzen, weshalb auf diesem Gebiet ein spürbarer Investitionsstau zu verzeichnen ist. Dieser Effekt wird bei Sicherungsanlagen an Bahnübergängen (BÜ) evident.

Obwohl die Anzahl der BÜ stetig reduziert wird, ist der Bestand nach wie vor sehr hoch (vgl. [Dam10]). Gemäß Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (EBO) und der Richtlinie (Ril) 815 der Deutschen Bahn AG (DB AG) müssen BÜ entweder technisch oder nichttechnisch gesichert werden (vgl. [EBO06], [DB08a]). Für nichttechnisch gesicherte BÜ müssen Sicherungsanlagen nachgerüstet werden sobald dies der rechtliche Rahmen vorschreibt. Wann eine technische Sicherung (straßenseitige Komponenten, wie Schranken, Lichtzeichen etc. und schienenseitige Komponenten der Überwachungsarten) erforderlich wird, zeigen so genannte Kritikalitäten auf, die zunächst straßen- und danach schienenseitig zu ermitteln sind. Dies kann beispielsweise aufgrund eines angestiegenen Verkehrsaufkommens erforderlich werden. Die Abbildung 1-1 erläutert grafisch die aus den verschiedenen betrieblichen, funktionalen und sicherungstechnischen Anforderungen (Kritikalitäten) resultierenden Bereiche der BÜ-Sicherung.



**Abbildung 1-1: Einteilung der Bahnübergangssicherung nach Kritikalitäten**

Das Umsetzen des Sicherns an BÜ beschreiben Sicherungsverfahren, die aus einem Betriebs-, Technologie- und Sicherungskonzept bestehen. Die technische Ausrüstung, bestehend aus straßen- und schienenseitigen technischen Komponenten, wird als Bahnübergangssicherungsanlage (BÜSA) bezeichnet. Für einige Sicherungsverfahren fehlen betrieblich-wirtschaftlich sinnvolle BÜSA-Konzepte. Hinzu kommt der Bedarf für neu zu erbauende BÜSA an Bahnübergängen, die heutzutage noch über keine technische Sicherung verfügen und eine Ursache für wenig performante Strecken sind [ES09]. Bei einigen BÜSA, die ihre Lebensdauer bereits erreicht haben, werden die erforderlichen Investitionen aufgrund der hohen LCC zurückgehalten. Dadurch wird der Erneuerungsbedarf, der allein bei bereits bestehenden Anlagen sehr hoch ist, in den kommenden Jahren noch weiter ansteigen (siehe Abbildung 1-2).



**Abbildung 1-2: Erneuerungsbedarf bei BÜSA (nach [Bus07])**

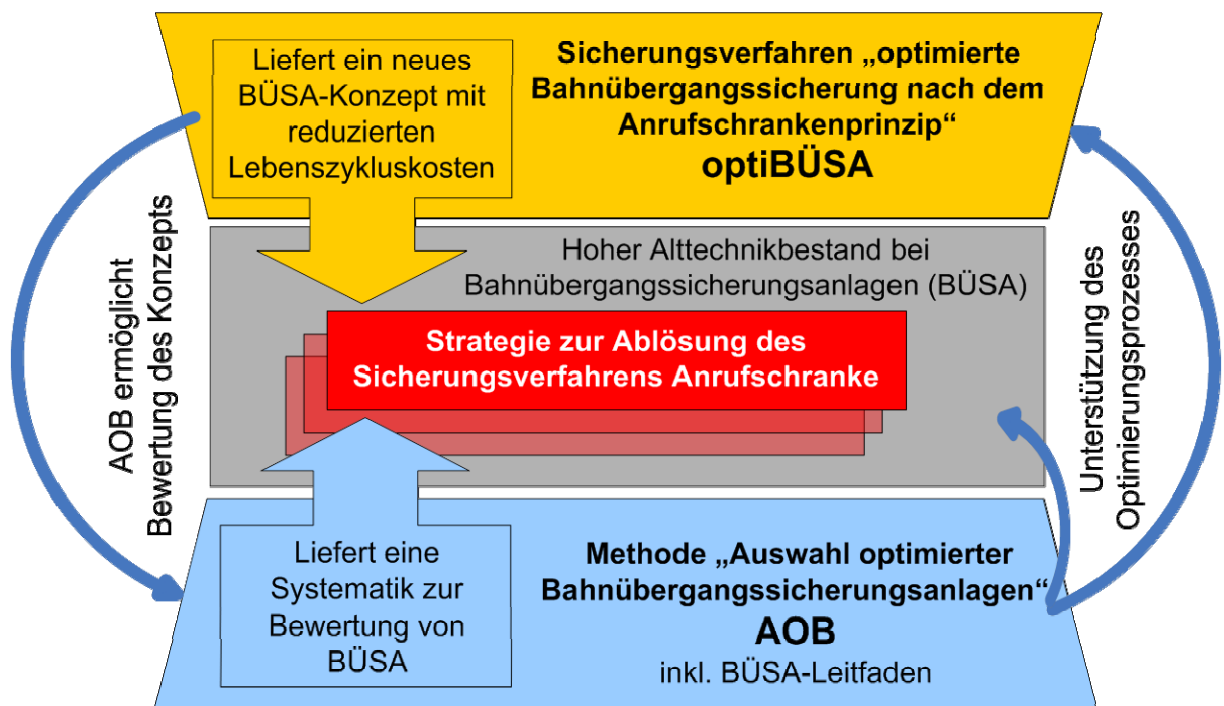
Das Sicherungsverfahren Anrufschränke bietet aufgrund des bedarfsgesteuerten Betriebskonzepts eine optimale betriebliche Lösung für Bahnübergänge mit hohem schienenseitigen und geringem straßenseitigen Verkehrsaufkommen. Aufgrund des abgängigen Technologie- und des ersatzbedürftigen Sicherungskonzeptes ist dieses Sicherungsverfahren jedoch nicht mehr sinnvoll [Hen02]. Für die deshalb etwa eintausend Bahnübergänge mit abgängigen Anrufschränken existiert heutzutage kein zufriedenstellendes Ablösekonzept. Die verfügbaren Alternativen sind mit sehr hohem finanziellem Aufwand verbunden; aufgrund des niedrigen Kritikalitäten-Mixes ist es nicht gerechtfertigt diese einzusetzen. Zum Erhalt des Betriebskonzepts muss deshalb ein neues Sicherungsverfahren bereitgestellt werden, das geringere LCC als bisher vorhandene ablösende Konzepte impliziert.

Um die Kosten entsprechend des Anforderungsspannungsfeldes adäquat zu gestalten, sind zunächst die effektivsten Kostensenkungspotenziale zu identifizieren. Die Kostenfaktoren sind bei BÜSA in die Kostenblöcke Projektengineering, Tiefbau und Technik unterteilbar, wobei nahezu die Hälfte der Aufwendungen auf den Tiefbau und das Projektengineering zurückzuführen sind [Lau08]. Ein innovatives Ablösekonzept hält für den Fall der abgängigen Alttechnik Anrufschränke dann ein entsprechend hohes Kostensenkungspotenzial im Bereich des Tiefbaus bereit, solange die dort übliche geringe Straßenbreite erhalten bleibt.

Eine Systematik, mit der innovative Ansätze hinsichtlich ihres Kostensenkungspotenzials und der betrieblichen Eignung bereits in der Konzeptphase einer Entwicklung bewertet werden können, existiert derzeit nicht.

## 1.1 Ziel und Nutzen der Arbeit

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Konzeption eines innovativen Bahnübergangssicherungsverfahrens, welches erstmals ein betrieblich, wirtschaftlich und sicherungstechnisch optimiertes Sicherungsverfahren zum Erhalt des bedarfsgesteuerten Betriebskonzepts von Anrufschraken ermöglicht. Hierfür werden ein neues Sicherungs- und Technologiekonzept eingeführt und die Einsatzbedingungen aufgezeigt. Darüber hinaus wird für eine Bewertung der optimierten Bahnübergangssicherung nach dem Anrufschrakenprinzip (optiBÜSA), und allgemein zur Auswahl und Bewertung neuer BÜSA-Konzepte, eine neue Methode eingeführt (vgl. Abbildung 1-3).

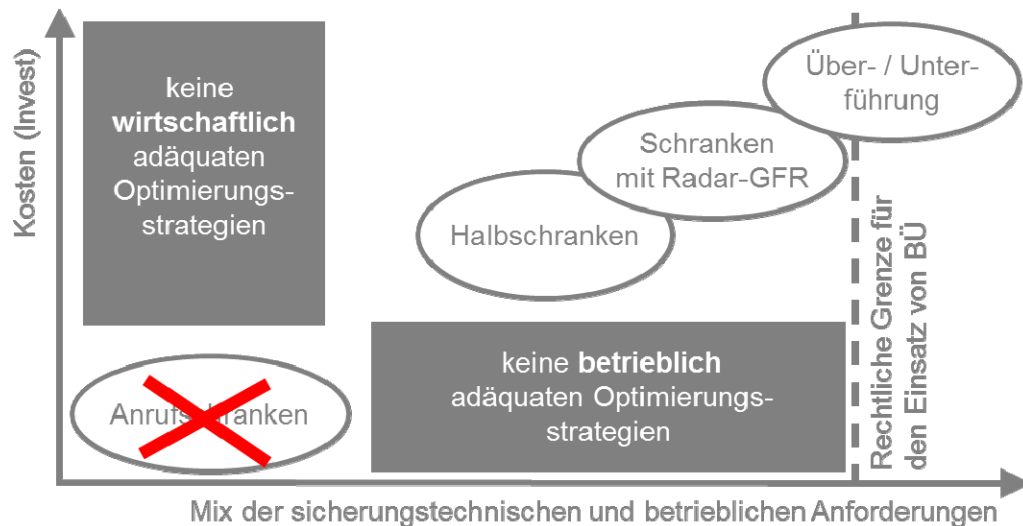


**Abbildung 1-3: Zusammenhang von Zielsetzung und Nutzen der vorliegenden Arbeit**

Mit der Methode „Auswahl optimierter Bahnübergangssicherungsanlagen“ (AOB) wird eine strukturierte Bewertung bereits während der Konzeption ermöglicht. Damit werden erstmals für dieses Umfeld strategische Entscheidungen hinsichtlich der Auswahl einer Optimierungsstrategie auf Basis von betrieblichen, sicherungstechnischen, wirtschaftlichen und nutzwertbasierten Kriterien systematisiert durchführbar. Dabei werden die Effizienz und die Nachvollziehbarkeit des Auswahlprozesses durch Einführung eines BÜSA-Leitfadens erhöht und die betriebliche Eignung neuer Ansätze überprüfbar. Der Leitfaden ist darüber hinaus als Entscheidungshilfe im Planungsprozess anwendbar und ermöglicht Anlagenmanagern und Planern die systematische Wahl der betrieblich-wirtschaftlich optimalen BÜSA für jeden BÜ. Die Identifikation einer geeigneten Optimierungsstrategie für die Ablösung der Alttechnik Anrufschrake wird im Rahmen der Arbeit methodisch durch die AOB unterstützt.

Bei fortschreitender Automatisierung des Bahnbetriebs können die Bediener die Grundfunktionen an Anrufschraken „Freimelden des Gefahrenraumes durch Hinhören“, „Bedarf zum Queren entgegennehmen“ und „die Schranken öffnen und schließen“ nicht mehr übernehmen – die Anrufschrake hätte ausgedient. Würden diese Funktionen dann nicht ersetzt wer-

den können, wären einige Bahnübergänge nicht mehr zu erhalten und müssten mit anderen BÜSA erneuert bzw. durch Über-/Unterführungen ersetzt oder beseitigt werden. Der Einsatz von Anrufschraken ist jedoch heute bei einem bestimmten Mix der sicherungstechnischen und betrieblichen Anforderungen (Kritikalitäten-Mix) die einzige Sicherungsmöglichkeit [Kef09]. Somit ist festzuhalten, dass aus betrieblichen Gesichtspunkten das Betriebskonzept des Sicherungsverfahrens Anrufschrake zu erhalten ist. Das Konzept optiBÜSA liefert für das Segment bedarfsgesteuerter BÜSA ein adäquates Sicherungsverfahren. Außerdem zeigt die Arbeit neue Ansätze für weitere Bereiche im BÜSA-Kontext auf, in denen es derzeit keine wirtschaftlich und/oder betrieblich adäquaten Lösungen gibt (siehe Abbildung 1-4).



**Abbildung 1-4: Bereiche im BÜSA-Kontext mit Optimierungspotenzial**

Mit den Ansätzen zur Optimierung von Prozessen und der Konzeption einer neuen Sicherungsanlage, wird eine Kostensenkung im Bereich von BÜSA angestrebt. Als Folge einer deutlichen Kostenreduktion würden ein höherer technischer Ausrüstungsgrad und somit ein leistungsfähigerer, verfügbarerer, wirtschaftlicherer und sicherer Bahnbetrieb erreichbar sein. Dieser Effekt ist insbesondere für Strecken am Rande ihrer Wirtschaftlichkeit von Bedeutung, da so die Gefahr einer Stilllegung verringert werden kann.

## 1.2 Derzeitiges Vorgehen bei der Auswahl geeigneter BÜSA

Veränderungen bei den Anforderungen an das Betriebskonzept, Technologiekonzept oder Sicherungskonzept erfordern in der Regel eine Modifikation am Sicherungsverfahren eines Bahnübergangs (BÜ). Sobald eine bestehende Sicherung nicht mehr den geltenden Bestimmungen entspricht, muss laut [Hac06] und [See96] im Netz der DB AG:

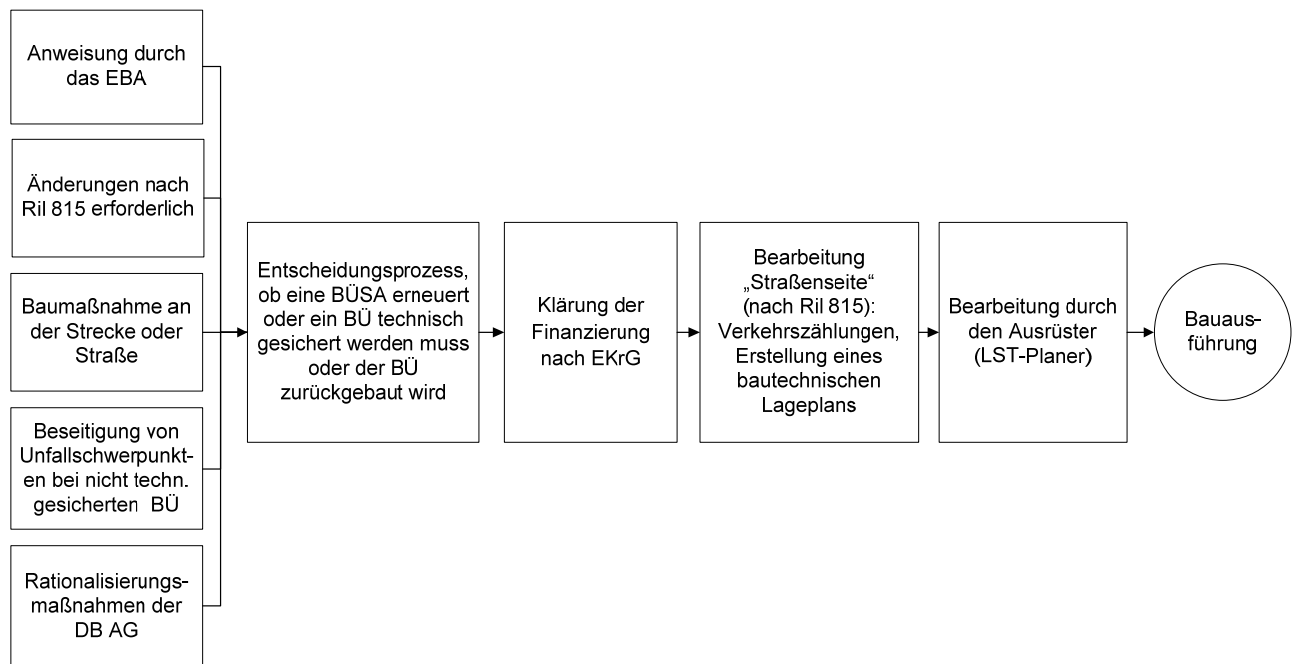
- die bestehende BÜSA erneuert bzw. ersetzt,
- bislang nichttechnisch gesicherte BÜ technisch gesichert oder
- der BÜ beseitigt werden.

Ein Bahnübergang ist eine Gemeinschaftsanlage, deshalb müssen bei Änderungen sowohl die Vorschriften der Eisenbahninfrastrukturunternehmen (EIU) als auch die des Straßenbaulastträgers eingehalten werden. Dazu gehören insbesondere die EBO, das Eisenbahn Kreuzungsge-

setz (EKG) und die Straßenverkehrsordnung (StVO) als gesetzliche Grundlage. Hierzu wird in [FMR03] ausgeführt: „Die Errichtung und Änderung von Bahnübergangsanlagen unterliegt in der Regel einem eisenbahnrechtlichen Zulassungsverfahren nach §18 des Allgemeinen Eisenbahngesetzes“. Im Vorfeld der Planungsausführung gilt es, wesentliche Kritikalitäten wie z.B. die Verkehrsstärke auf Schiene und Straße zu erheben [MFS05]. Daraus leiten sich in Verbindung mit der EBO, der Ril 815 und den straßenseitigen Vorschriften (z.B. RAS-Q) die Anforderungen an die BÜ-Sicherungsart, die Trassierung und die Gestaltung der straßenseitigen Anlagen ab. Dazu gilt nach [Str08] der Grundsatz: „Die kostengünstigste und wirtschaftlichste Variante ist zu planen!“.

Da Erhaltung und Verbesserung der Sicherheit mit hohen Kosten verbunden sind, sind neue Konzepte möglichst effizient zu gestalten [SP07]. Maßnahmen für eine technische Sicherung an BÜ führen unweigerlich zu hohen Anschaffungs- und Betriebskosten. Oft fallen diese Kosten inadäquat hoch aus, weil die Anlagen nicht dem aktuellen Kritikalitäten-Mix entsprechend projektiert wurden, so dass mancherorts überdimensionierte, technisch hoch komplexe und somit teure Lösungen realisiert werden.

Die Planung von BÜ erfolgt derzeit in mehreren Teilschritten. Eine vereinfachte Darstellung dieses Prozesses zeigt Abbildung 1-5.



**Abbildung 1-5: Prozess bei abgängiger BÜ-Sicherung im Netz der DB AG (nach [BPA09])**

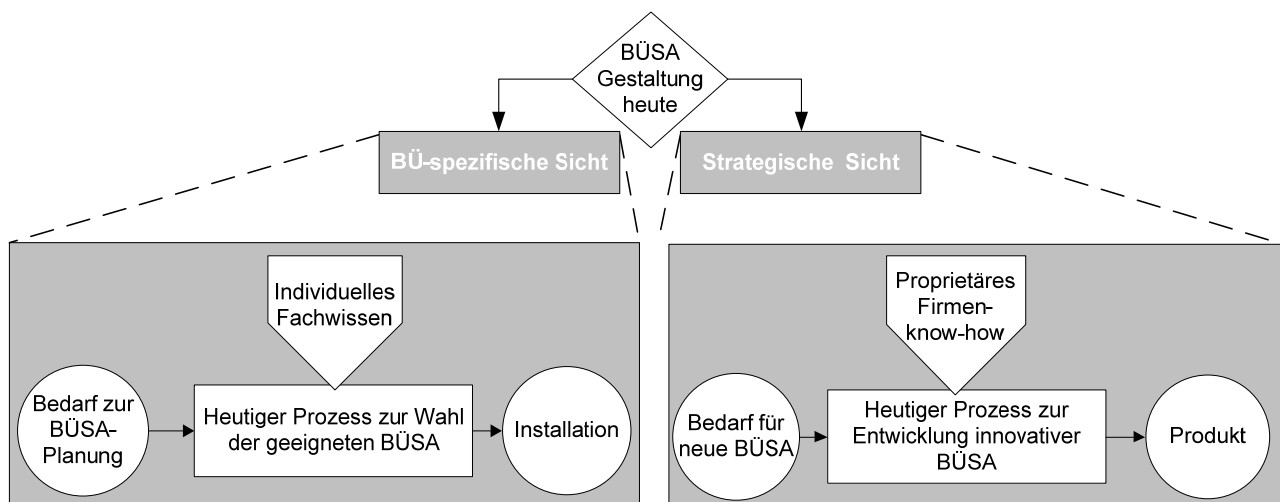
Vor Beginn der Planung muss zunächst geprüft werden, ob ein Handlungsbedarf an dem entsprechenden Bahnübergang vorliegt. Die Veranlassung für die Veränderung eines BÜ kann dabei folgende Ursachen haben:

- Das Eisenbahn-Bundesamt (EBA) gibt auf der Grundlage von festgestellten Mängeln die Anweisung, einen Bahnübergang baulich oder sicherungstechnisch zu verändern.
- Es sind Änderungen gemäß der Ril 815 erforderlich, um gesetzliche Auflagen zu erfüllen. Dazu werden Verkehrs-/Bahnübergangsschauen und Inspektionen durchgeführt (vgl. [Ruh06], [Men07], [Wit07]).

- Bei Baumaßnahmen an der Strecke wird überprüft, ob ein BÜ während dieser Baumaßnahme ebenfalls erneuert werden muss.
- Des Weiteren wird in diesem Zusammenhang überprüft, ob Straßenbaumaßnahmen wie z.B. Ergänzung von Geh- und Radwegen durchgeführt werden müssen.
- Zur Senkung der Unfallgefahr aufgrund geänderter Kritikalitäten bei nichttechnisch gesicherten BÜ wird eine technische Sicherung erforderlich.
- Es werden Rationalisierungsmaßnahmen (Schließung des Bahnübergangs, Einbindung der örtlich bedienten BÜSA in ein Stellwerk etc.) durch die DB AG gefordert, z.B. aufgrund einer zentralisierten Betriebsführung.

Daraufhin beginnt ein Entscheidungsprozess zwischen dem Eisenbahninfrastrukturunternehmen (EIU), dem Straßenbaulastträger und der Gebietskörperschaft, ob ein BÜ beseitigt oder erneuert werden soll. Dabei werden die Belange aller Kreuzungsbeteiligten berücksichtigt. Nach Abstimmung über die erforderlichen Baumaßnahmen wird eine Festlegung der Finanzierung gemäß EKrG [EKG01] getroffen. Im Anschluss daran erfolgt die Planung einer BÜSA bei der auch eine geeignete Sicherungsart zu ermitteln ist (vgl. [Sch09a], [Sch09b], [Sch09c], [Sch09d], [Sch09e]), wobei zuerst die Bestimmung der straßenseitigen und anschließend der schienenseitigen Sicherung erfolgt. Dabei gibt es eine Vielzahl von Richtlinien und Regelwerken zu beachten (vgl. Anhang A.2). Bei der schienenseitigen Planung wird die Überwachungsart festgelegt. Nach Abschluss des Planungsprozesses beginnt der Bau der Anlage.

Parallel zur Betrachtung einzelner Bahnübergänge und ihrer Planung existiert die strategische Sichtweise auf investitive Bedürfnisse (siehe Abbildung 1-6). Diese erlaubt eine Bedarfsermittlung neuer BÜSA-Konzepte, fragt nach Entwicklungsnotwendigkeiten neuer Produkte und legt Optimierungsstrategien offen.

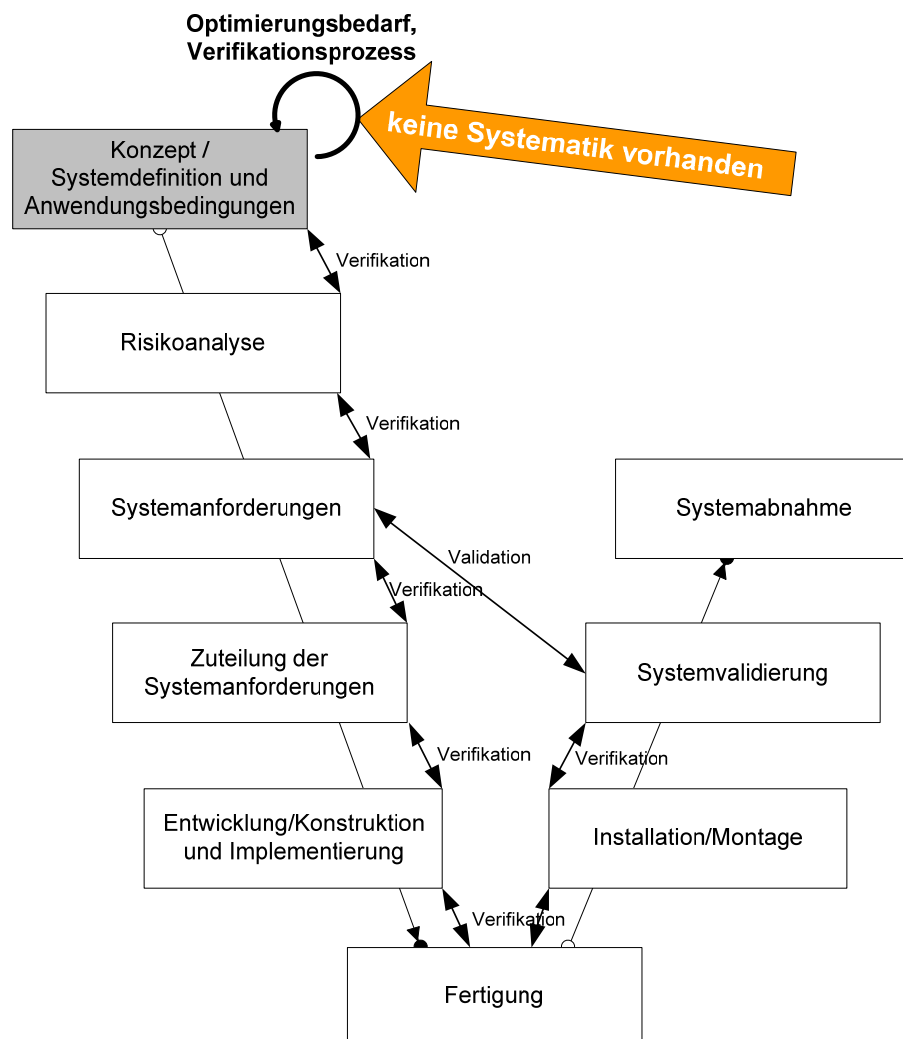


**Abbildung 1-6: Sichtweisen auf die Gestaltung von BÜSA**

Die Entwicklung von LST orientiert sich heutzutage an den Zielen von CENELEC (Europäisches Komitee für elektrotechnische Normung). Das Vorgehen nach CENELEC fordert die Strukturierung komplexer Handlungsfolgen zur Herstellung komplexer Gegenstände. Die Hersteller und Betreiber müssen demzufolge eine durchgängige Entwicklung nach CENELEC nachweisen (vgl. [ES07]). Der resultierende Vorteil liegt in der Beherrschung von der Entwicklung sowohl von Soft- und Hardware, als auch von komplexen Systemen (bestehend aus Soft- und Hard-

ware). Daher wird das Vorgehensmodell (V-Modell) nach [CEN99] auch für die Produktentwicklung von LST eingesetzt [Kno07].

Für den Bereich der BÜSA existiert zurzeit keine Systematik mit der in der Konzeptphase nach CENELEC ein neuer Ansatz hinsichtlich seines Potenzials (betrieblich und wirtschaftlich) bewertet bzw. verifiziert werden kann (siehe Abbildung 1-7). Bei der Auswahl neuer BÜSA-Konzepte im Rahmen einer Entwicklung wird im Wesentlichen auf die Erfahrung der Mitarbeiter bei den Herstellern gesetzt, die sich mit den Mitarbeitern der Betreiber über deren Bedarf austauschen und dementsprechend neue Lösungen entwerfen. Durch diese oft enge Zusammenarbeit wird gewährleistet, dass vor allem praxisrelevante Lösungen entwickelt werden. Hochgradig innovative Ansätze werden mitunter bereits in dieser frühen Phase nicht weiterverfolgt, da oft das Potenzial solcher Anlagen gegenüber Dritten nicht klar darstellbar ist.



**Abbildung 1-7: V-Modell zum Entwicklungsprozess (nach [CEN99])**

Auch während der Planung erfolgt die Auswahl der einzusetzenden BÜSA anhand des individuellen Wissens Einzelner. Dadurch ist nicht auszuschließen, dass bestimmte BÜSA-Typen favorisiert werden, die nicht das betrieblich-wirtschaftliche Optimum darstellen. Das Ziel muss es daher sein, die kostengünstigste und wirtschaftlichste Anlage während der Planung bzw. in der Konzeptphase einer Entwicklung ermitteln und bewerten zu können.



Eine Methode, mit welcher der Gesamtnutzen einer Anlage aufgezeigt und die betriebliche Eignung nachgewiesen bzw. bewertet werden kann, wäre eine sinnvolle Ergänzung zum derzeit bekannten Vorgehen in der Entwicklung von Bahnübergangssicherung.

### 1.3 Aufbau der Arbeit

Nachdem im ersten Kapitel die Zielstellung erörtert wurde, werden im zweiten Kapitel die wesentlichen Merkmale der technischen Bahnübergangssicherung erläutert. Im Besonderen wird die Anrufschränke als deutsche Ausführung von Bahnübergangssicherungsverfahren mit bedarfsgesteuerten Schranken dargestellt, welche im Fokus der Betrachtungen dieser Arbeit liegt. Darüber hinaus folgt eine Übersicht zu aktuellen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im Kontext der Bahnübergangssicherung. Vor dem Hintergrund der erforderlichen Ablösung von Anrufschränken werden insbesondere Ansätze zur Hinderniserkennung im Gefahrenraum beleuchtet. Dies ist insofern erforderlich, da die bisher einzige zugelassene Technologie zur Gefahrenraumfreimeldung einen wesentlichen Anteil an den hohen Investitionen bei Bahnübergangssicherungen mit Schranken darstellt.

Bei der Auswahl von BÜSA werden heutzutage nicht unbedingt die wirtschaftlich besten Lösungen bestimmt. Eine bedarfsgerechte Bestimmung der Technik erfolgt nur an wenigen Stellen. Bei Anwendung der in Kapitel 3 beschriebenen Methode wird zukünftig bereits Anlagenmanagern eine Bewertung neuer BÜSA-Konzepte hinsichtlich der betrieblichen und wirtschaftlichen Effekte ermöglicht. Um Konzepte hinsichtlich betrieblicher Eignung zu verifizieren, wird ein Leitfaden vorgestellt der als Bestandteil der neuen Methodik zum Einsatz kommt. Für die Entscheidungsfindung werden zunächst Kritikalitäten herausgearbeitet. Weiterhin werden für die Umsetzung der mit der Methodik einhergehenden Analyse- und Bewertungsschritte die derzeit verfügbaren Instrumente zur Bewertung und Analyse von technischen Systemen diskutiert. Das Ergebnis sind die erforderlichen Arbeitsschritte zur Auswahl optimierter Bahnübergangssicherungsanlagen in der Entwicklung. Der hierfür entwickelte BÜSA-Leitfaden wird darüber hinaus in der Planung von BÜ-Sicherungskonzepten einsetzbar sein und dort zu einer effizienten Auswahl der betrieblich-wirtschaftlich optimalen technischen Sicherung führen.

Zur Reduktion der LCC werden Innovationen in den Bereichen Anforderungen, Systemarchitektur und Prozesse benötigt. Die Neu- bzw. Weiterentwicklung von BÜSA-Konzepten, beispielsweise durch Alternativen zur einzigen zugelassenen technischen Gefahrenraumfreimeldeinrichtung, ist zur Steigerung der Erneuerungsrate erforderlich. Die Arbeit greift diesen Bereich im Kapitel 4 auf und wird den Optimierungsbedarf zur Ablösung von Anrufschränken als Voraussetzung zur nachhaltigen Kostensenkung im Lebenszyklus bestimmter Bahnübergänge erläutern. Mit Unterstützung der zuvor entwickelten Methodik und den dargestellten Eigenschaften der Anrufschränke werden der Ist-Stand analysiert und die Systemanforderungen zusammengestellt. Wo das Ersetzen eines Bahnübergangs mit Anrufschränke durch Unter- oder Überführungen zu kostenaufwändig oder der verfügbare Platz nicht ausreichend ist, wird es stets zu Erhaltungsmaßnahmen der eingesetzten Sicherung kommen. Als Optimierungsstrategie wird die Automatisierung der betrieblichen Funktionen der Anrufschränke empfohlen. Da dieser Ansatz bisher u. a. mangels geeigneter Bahntechnologie nicht realisiert werden konnte, wird der Einsatz von Industriekomponenten, wie beispielsweise Stereo-

Kameras, motiviert. Eine wesentliche Aufgabe der Arbeit besteht darin, ein solches innovatives Technologiekonzept für den Bahnbereich sinnvoll zu erschließen, um zur nachhaltigen Kostensenkung im Bereich der Technik (z.B. durch Nutzung von Industriekomponenten) und des Betriebes (z.B. durch Entwurf neuer Sicherungskonzepte, die bisher aufgrund fehlender Realisierungsmöglichkeiten auf Seiten der Technik nicht umgesetzt werden konnten) beizutragen. Die technischen, betrieblichen, rechtlichen und wirtschaftlichen Anforderungen an ein solches Technologiekonzept werden zusammengetragen und die verfahrenssichere Einbindung in den Bahnbetrieb analysiert.

In Kapitel 5 wird die optimierte Bahnübergangssicherung nach dem Anrufschrakenprinzip (optiBÜSA) beschrieben. Hier wird ein automatisiertes und bedarfsgesteuertes Sicherungsverfahren nach dem betrieblichen Vorbild der Anrufschrake entworfen, welches auf dem Betriebskonzept mit bedarfsgesteuerten Schranken basiert. Dieses Konzept wurde erstmals in [PM09] beschrieben und nutzt ein bisher bahnfremdes Technologiekonzept aus der Robotik. Damit dieser Ansatz gelingt, führt die Arbeit mit dem Januskopfalgorithmus ein Verfahren ein, welches beschreibt, wie speziell für bedarfsgesteuerte BÜSA eine Bildverarbeitung des Stereo-Kamera-System zu gestalten ist. Eine neue Technologie zur Anrufschrakenautomatisierung ist aufgrund der geringen Stückzahlen wenig attraktiv für Neuentwicklungen, weshalb in diesem Kapitel weitere Anwendungsfelder für den Einsatz dieser Technologie aufgezeigt werden. Hierbei wird neben dem betrieblichen und sicherungstechnischen Verfahren ein innovatives Verfahren zur technischen Gefahrenraumüberwachung eingeführt. Mit diesem Realisierungsansatz werden weitere Funktionen wie die Rückstauerkennung zur bedarfsgesteuerten Ansteuerung von vorgeschalteten Lichtzeichen für die Nutzung im Bahnübergangskontext vorbereitet.

Das neue Sicherungsverfahren optiBÜSA wird im sechsten Kapitel kritisch hinsichtlich Sicherheit, betrieblicher Eignung und Wirtschaftlichkeit analysiert. Hierzu wird die in Kapitel 3 entwickelte Methode zur Bewertung von BÜSA-Konzepten angewendet. Zur Überprüfung der betrieblichen Eignung wird optiBÜSA in den BÜSA-Leitfaden, dem entwickelten Bewertungsschema für neue BÜSA-Konzepte, aufgenommen. Dadurch ist optiBÜSA eine weitere Auswahlmöglichkeit bei der Bestimmung der optimalen Bahnübergangssicherung für einen Beispielbahnübergang. Mit dieser wissenschaftlichen Methodik zur Bewertung und Einordnung neuer BÜSA wird eine Überprüfung hinsichtlich der betrieblich-wirtschaftlichen Eignung möglich. Mit diesem Vorgehen wird gezeigt, dass optiBÜSA für die Ablösung des Sicherungsverfahrens Anrufschrake prinzipiell geeignet ist.

Im letzten Kapitel werden die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zusammengefasst und die wissenschaftlichen Desiderata dargestellt.

Die Abbildung 1-8 veranschaulicht die Zusammenhänge in dieser Arbeit.

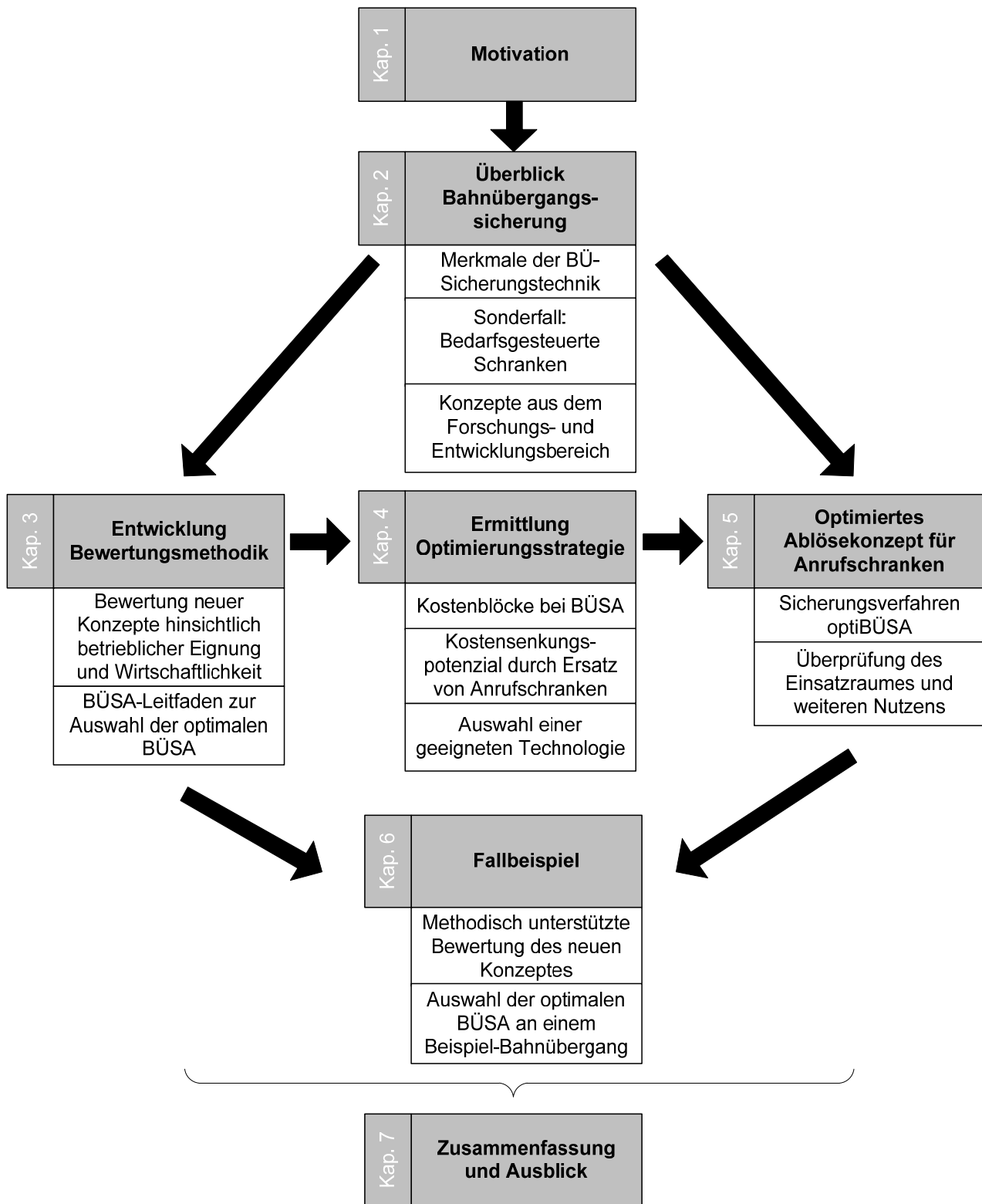


Abbildung 1-8: Struktur der Arbeit

## 2 Stand der Technik und Forschung im Kontext der BÜ-Sicherung

In Deutschland wird der von Straße und Schiene gemeinsam benutzte Verkehrsraum als Bahnübergang bezeichnet. Dieser ist bis zu einer Streckengeschwindigkeit auf der Schiene von  $v_{Tfz} = 160 \text{ km/h}$  (vgl. [Rei01]) zulässig. Die Bremswege der Schienenfahrzeuge übersteigen dabei mit etwa 1000 m die Sichtweite der Triebfahrzeugführer um ein Vielfaches (vgl. [Pac02]), weshalb hier besondere Maßnahmen zur Wahrung der Sicherheit erforderlich sind. Bei höheren Geschwindigkeiten sind Bahnübergänge unzulässig. Aufgrund des Gefährdungspotentials durch Fehlhandlungen zumeist seitens der Straßenverkehrsteilnehmer, gibt es weltweit die Bestrebung Bahnübergänge grundsätzlich zu beseitigen. Diejenigen, die nicht beseitigt werden können, müssen auch zukünftig entsprechend geltender Richtlinien und Gesetze gesichert werden.

Im deutschen Eisenbahnstreckennetz existieren noch insgesamt etwa 26.000 Bahnübergänge (vgl. [Sch10]); allein im Netz der DB AG gibt es zurzeit ca. 20.000 (vgl. [Dam10]) bei denen zwischen technischer und nichttechnischer Sicherung unterschieden wird. Sobald eine technische Sicherung erforderlich ist, werden Bahnübergangssicherungsanlagen (BÜSA) eingesetzt. BÜSA werden in straßen- und schienenseitige Komponenten unterteilt, wobei der Anteil der Schiene dem Bereich der LST zugeordnet wird.

### 2.1 Merkmale technischer Sicherung von Bahnübergängen

Nach Reason [Rea97] verfügt jedes System über ein Sicherheitskonzept, bestehend aus Sicherheitsschichten, die dazu beitragen Risiken zu mindern, Gefahren und Versagen abzuwenden, Fehler abzufangen und Unfälle zu verhindern (siehe Abbildung 2-1, vgl. [PSM07]).

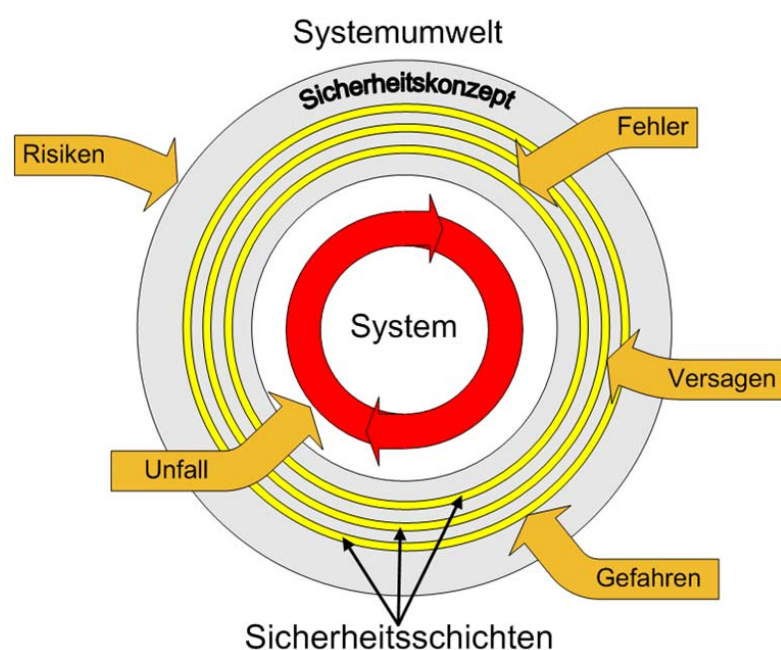
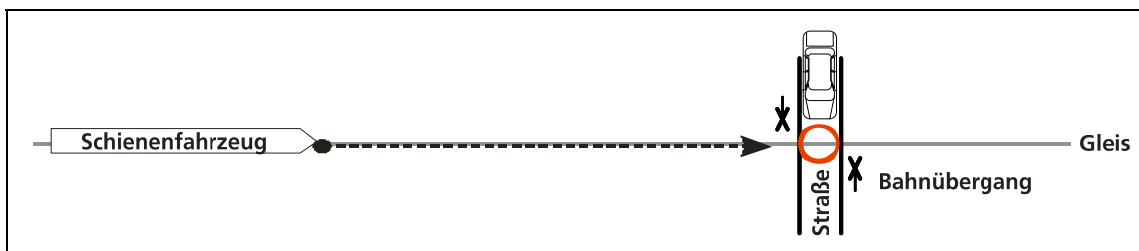


Abbildung 2-1: Generische Darstellung von Sicherheitskonzepten

Das Sicherheitskonzept bei BÜSA ist das Sicherungskonzept des Sicherungsverfahrens, welches je nach Kritikalitäten-Mix durch Sicherheitsschichten (vgl. [PSM07], [SP08]) beschrieben wird, die zum Schutz des Schienenverkehrs und der Verkehrsteilnehmer erforderlich sind. Systembedingte Unterschiede zwischen den beiden Verkehrsträgern Straße und Schiene wie etwa die deutlich unterschiedlichen Bremswege machen Sicherungsschichten sowohl straßen- als auch schienenseitig notwendig die derart gestaltet sein müssen, dass Kollisionen zwischen Straßenverkehrsteilnehmern und Schienenfahrzeugen verhindert werden. Der bei Bahnübergängen maßgebliche Gefahrenpunkt den es zu schützen gilt, wird als Gefahrenraum bezeichnet (siehe Abbildung 2-2). Hierfür müssen verschiedene Komponenten zusammengeführt werden. Aus der Systemumwelt von BÜSA können in den Prozess des Sicherns auch Straßenverkehrsteilnehmer, Züge und Stellwerke eingebunden sein.



**Abbildung 2-2: Gefahrenraum - der Gefahrenpunkt am Bahnübergang**

### **Straßenseitige Sicherheitsschichten**

An öffentlichen Bahnübergängen wird immer das Andreaskreuz (Zeichen 201 gemäß Straßenverkehrsordnung (StVO) [SVO01]) eingesetzt, welches den Vorrang des Schienenverkehrs anzeigt. Als Möglichkeiten für eine Sperrung der Straße werden Lichtzeichen (Lz), Halbschranken (H) und Schranken mit voll abschließendem Schrankenbaum (V) oder doppelt halbabschließenden Schrankenbäumen (HH) eingesetzt.

Eine straßenseitige Sicherungssequenz ist in Deutschland wie folgt umgesetzt:

- 1) In Grundstellung sind die Schrankenbäume geöffnet.
- 2) Die Sicherung wird schienenseitig aktiviert und eingeschaltet.
- 3) Die Lichtzeichen (Lz) zeigen drei Sekunden gelb (sollten vorgeschaltete Lichtzeichen (vLz) installiert sein, werden diese vor den Lz am Bahnübergang eingeschaltet).
- 4) Die Lz wechseln auf rot.
- 5) Die Schrankenbäume (V, HH, H) schließen.
- 6) Bei V und HH erfolgt eine Gefahrenraumüberwachung und -freimeldung, da Hindernisse zwischen den voll abschließenden Schranken eingeschlossen sein können.
- 7) Der Zug quert den Bahnübergang.
- 8) Die Schrankenbäume gehen in Grundstellung, die Lz schalten aus.
- 9) Die Sicherung wird ausgeschaltet und es erfolgt die Freigabe.

Diese Sequenz wird bei jeder Zugfahrt angestoßen und ist nicht abhängig von der Anwesenheit eines Straßenverkehrsteilnehmers. Das Sicherungsverfahren Anrufschanke bildet hier die einzige Ausnahme.

### Schienenseitige Sicherheitsschichten

Damit die straßenseitigen Komponenten eingeschaltet werden können, muss die Annäherung des Zuges an den Bahnübergang erkannt werden. Hierfür wird schienenseitig ein Einschalt-punkt festgelegt. Erst wenn der Bahnübergang gesichert ist, darf er ohne Einschränkung durch den Zug befahren werden. Ebenso muss erkannt werden, wenn der Zug den Bahn-übergang vollständig verlassen hat. Danach wird der Zustand der Sicherung aufgehoben und der Bahnübergang für den Straßenverkehr wieder freigegeben.

Die Überwachung der Einschaltung bzw. der Einschaltbereitschaft einer BÜSA ist notwendig, um Störungen oder Defekte unverzüglich zu offenbaren [FNT03]. Derzeit werden in Deutsch-land für Neuanlagen die Überwachung mittels eines Überwachungssignals (ÜS), Überwa-chung mittels eines Hauptsignals (Hp), Überwachung durch Fernüberwachung (Fü), Überwa-chung mittels eines Überwachungssignals mit optimierter Einschaltung (ÜS<sub>OE</sub>) und Mischfor-men eingesetzt (vgl. [Sch07a], [FNT03], [Wit03]), wobei diese sich neben dem Einsatz unter-schiedlicher Komponenten durch ihre Ansteuerung (zuggesteuert oder signalgesteuert) und den Zustand der Überwachung unterscheiden (siehe Tabelle 2-1).

Ansteuerung	signalgesteuert	zuggesteuert		
Überwachungsart	Hp	ÜS	Fü	ÜS <sub>OE</sub>
Überwachungsart Mischformen	Hp/ÜS, Hp/Fü	Hp/ÜS	Hp/Fü	
Zustand der Überwachung	Einschaltung		Einschaltbereitschaft	

Tabelle 2-1: Überwachungsarten

### Systemarchitektur von Bahnübergangssicherungsanlagen

Für die Wahrung der Sicherheit an Bahnübergängen mit technischer Sicherung werden Siche-rungsverfahren benötigt die aus Sicherungskonzept, Technologiekonzept und Betriebskon-zept bestehen. Die Sicherungsverfahren unterscheiden sich in ihren funktionalen, betriebli-chen, wirtschaftlichen und sicherungstechnischen Anforderungen. Ein Betriebskonzept wird maßgeblich durch die zu erfüllenden Funktionen, wie die Art der Überwachung, bestimmt. Das Technologiekonzept resultiert aus den gemäß Betriebskonzept erforderlichen Funktionen. Mit dem Sicherungskonzept wird die Logik des Sicherns beschrieben.

Das Gesamtsystem BÜSA besteht aus drei Ebenen: der operativen Leitebene (z.B. Bedienerar-beitsplatz), der Sicherungsebene (z.B. sicherer Rechnerkern) sowie der Prozessebene (techni-sche Abläufe, wie z.B. die vollständige Sequenz einer Sicherung) und findet sich in allen Sys-temarchitekturen der Bahnübergangshersteller (Pintsch Bamag: z.B. RBÜT [PB10]; Scheidt & Bachmann: z.B. BUES 2000 [SB10]; Siemens: z.B. SIMIS LC [Sie10]) wieder. Innerhalb dieser Ebenen werden Funktionen in verschiedenen Kombinationen umgesetzt.

Grundfunktionen (siehe Tabelle 2-2) erfüllen an den Bahnübergang gestellte Anforderungen, beispielsweise Gefahrenraumüberwachung, und werden losgelöst von der Art einer Umset-zung (technisch oder nichttechnisch) betrachtet. Sie bestehen aus Aktionen und Informatio-nen. Einrichtungen zur Erfüllung einer oder mehrerer Funktionen werden Funktionsträger ge-nannt, die durch straßen- und schienenseitige Komponenten ausgeführt und je nach örtlichen Gegebenheiten am Bahnübergang eingesetzt werden (siehe Tabelle 2-3).

Grundfunktionen von BÜSA	Beschreibung
Aktivierung	Aktivierung der Anlage bei Annäherung eines Zuges an der Einschaltstelle oder durch das Stellwerk als Fahrwegelement.
Einschaltung	Einschalten der Sicherungsanlage des Bahnübergangs
Gefahrenraumüberwachung (nur bei Schrankenanlagen mit vollem Straßenabschluss Pflicht)	Die Gefahrenraumüberwachung dient der Detektion von Objekten, die in den Gefahrenraum am Bahnübergang hineinragen. Bei Schrankenanlagen erfolgt eine direkte oderameratechnisch übertragene Überwachung des Gefahrenraums. Bei Halbschrankenanlagen erfolgt aufgrund der Möglichkeiten zur Räumung des Gefahrenraums auch bei geschlossenen Halbschranken in der Regel keine Überwachung.
Überprüfung der Einschaltung bzw. der Einschaltbereitschaft	Überprüfung der Fähigkeit, die Sicherung durchzuführen
Ausschalten	Ausschalten der Anlage nach vollständigem Verlassen des Zuges
Freigabe	Freigeben des BÜ für den Straßenverkehr

Tabelle 2-2: Grundfunktionen einer Bahnübergangssicherungsanlage

Funktionsträger	Einsatzbereich
Lichtzeichen (Lz), vorgeschaltete Lz (vLz), Fußgänger-Akustik, Andreaskreuz und weitere Verkehrsschilder zur Ankündigung des Bahnübergangs	Straßenseitige Sicherungskomponenten
Halbschranken (H), Schranken (V oder HH)	Schrankenantriebe und -bäume
Technische Gefahrenraumfreimeldung (GFR), Fernbeobachtungsanlage, Aktivierungssensorik, Wechselsprecher, Beleuchtungsanlage	zusätzliche Ausrüstung am Bahnübergang
Steuerung, Diagnose, Rechner, Innenanlage im Schalthaus	Schalthaus der Bahnübergangssicherungsanlage
Abhängigkeiten zwischen verschiedenen BÜSA (BÜ-BÜ Schnittstelle), Kombinierte Bahnübergangs- und Straßenanlage (BÜSTRA), zum Stellwerk (Hp oder Fü)	Schnittstellen
Signale (Bü0/1) und 1000-Hz-Magnet	Überwachungssignal
Einschaltelement, Ausschaltelement, AutoHET (automatische Hilfseinschalttaste), UT (Unwirksamkeitstaste), HET (Hilfseinschalttaste), RS (Rangierschalter), ET (Einschalttaster)	Schaltmittel
Interne Stromversorgung, externe Stromversorgung, Energieanschluss	Energienetz
Melde- und Bedieneinrichtung	Bedienraum im Stellwerk
Notstromversorgung	Technikraum im Stellwerk, Schalthaus der BÜSA
Geräte/Baugruppen, Kabelanbindung	Technikraum im Stellwerk

Tabelle 2-3: Einsatzbereiche von Funktionsträgern

## 2.2 Bedarfsgesteuerte Bahnübergangssicherung

In verschiedenen Ländern werden Sicherungsverfahren mit bedarfsgesteuertem Betriebskonzept eingesetzt. Die Schranken werden bei dieser Sicherungsart erst durch Bedarf zum Queren seitens des Straßenverkehrs geöffnet und sind in Grundstellung geschlossen. Aus eisenbahnbetrieblicher Sicht ist dieses Prinzip dann optimal, wenn die bahnseitige Verkehrsbelastung hoch und die der Straßenseite gering ist (vgl. [DB08a]). In Deutschland werden Anrufschranken zur bedarfsgesteuerten Bahnübergangssicherung eingesetzt (siehe Abbildung 2-3).

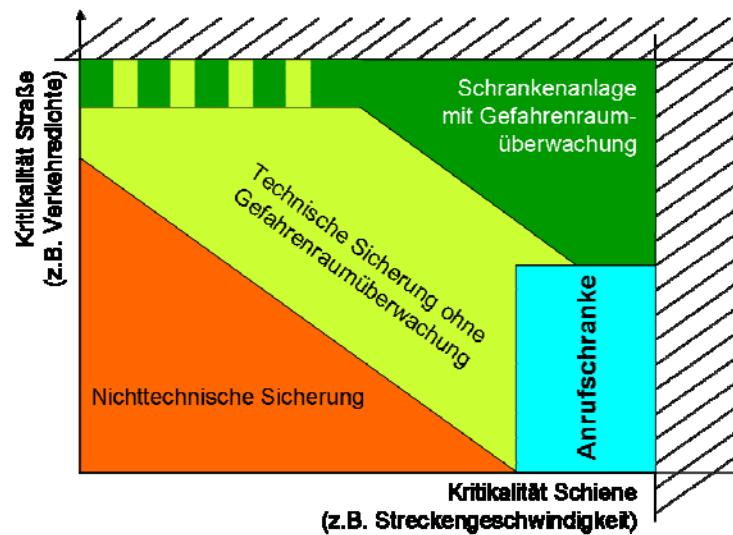


Abbildung 2-3: Anrufschränke im Kontext der BÜ-Sicherung

### 2.2.1 Anrufschränke

Die Entwicklung der Anrufschränke ging aus den wärterbedienten Schrankenanlagen hervor, bei der jeweils ein Bediener vor Ort die Sicherung des Bahnübergangs durchführte. Im Zuge von Automatisierungsmaßnahmen bei der LST wuchs die Stellentfernung für Komponenten der Bahnübergangssicherung, so dass die Funktion des örtlichen Schrankenwärters häufig in ein Stellwerk integriert wurde. Von einem Stellwerk aus ließen sich dadurch mehrere in einem Stellbezirk vorhandene Bahnübergänge von zentraler Stelle aus bedienen. Aufgrund der dann nicht mehr ausreichenden Sichtverhältnisse auf den Gefahrenraum wurden einige, nicht einsehbare Bahnübergänge mit einer Wechselsprechanlage (siehe Abbildung 2-4 [Fotos: Autor]) ausgestattet und die geschlossenen Schranken als Grundstellung festgelegt [Arn87].



Abbildung 2-4: Bahnübergang mit Anrufschränke

Im Unterschied zur herkömmlichen technischen Bahnübergangssicherung wird der Bahnübergang nicht für jeden passierenden Zug gesichert, stattdessen wird für den querenden Straßenverkehr die Sicherung kurzzeitig aufgehoben. Möchte ein Straßenverkehrsteilnehmer den Bahnübergang überqueren, muss der Bedarf über den Wechselsprecher bei dem zuständigen Bediener angemeldet werden. Dieser nimmt den Anruf über die Wechselsprecheinrichtung entgegen. Anschließend überprüft er mit der verfügbaren Zugsicherungstechnik die Zugposition, um zu erkennen, ob für den Zeitraum der Öffnung eine Zugfahrt über den Bahnüber-



gang stattfindet. Befindet sich ein Zug kurz vor oder in dem entsprechenden Blockabschnitt, wird der Bediener die Schranken vor der Zugquerung nicht öffnen und informiert den Straßenverkehrsteilnehmer über die Zugquerung. Nach der erfolgten Zugquerung prüft der Bediener erneut die Zugposition. Ist die Strecke frei, leitet der Bediener das Öffnen der Schranken ein. Dieser Vorgang kann deshalb mehrere Minuten in Anspruch nehmen.

Über die Wechselsprechanlage verfolgt der Bediener das Queren des Straßenverkehrsteilnehmers. Handelt es sich um Fußgänger oder Radfahrer, werden diese nach erfolgter Querung um eine Meldung der vollständigen Überquerung an den Bediener gebeten [End06]. Das Queren von motorisierten Fahrzeugen erkennt der Bediener über die Fahrgeräusche. Kann der Bediener den Gefahrenraum nicht zweifelsfrei als frei erkennen, ist eine Überprüfung nur über das Nachfragen mittels Wechselsprechanlage möglich. Ist kein Geräusch wahrnehmbar, leitet er nach der Abgabe der Warnung „Achtung, Schranken werden geschlossen“ das Schließen der Schranken ein. Der Bahnübergang befindet sich damit wieder in der Grundstellung, die besagt, dass der Bahnübergang gesichert ist.

Die Funktionen der Anrufschanke weichen teilweise vom sicherungstechnischen Verständnis der Grundfunktionen von BÜSA ab, weshalb für die Anrufschanke spezifische Grundfunktionen gelten (siehe Tabelle 2-4).

Funktionen der Anrufschanke	Zuordnung zu den Grundfunktionen von BÜSA	Grundfunktionen der Anrufschanke	Ausführendes Teilsystem / Komponente
Anmeldewunsch erkennen	Aktivierung	Anmeldung des Öffnungswunsches	Wechselsprechanlage
Anmeldewunsch entgegennehmen	Aktivierung	Anmeldung des Öffnungswunsches	Bediener
Dem Straßenverkehrsteilnehmer (StVTn) signalisieren, dass er erkannt wurde	Aktivierung	Anmeldung des Öffnungswunsches	Bediener über Wechselsprechanlage
Überprüfen, ob Zugposition das Öffnen der Schranken zulässt	Überprüfung der Einschaltung bzw. der Einschaltbereitschaft	Anmeldung des Öffnungswunsches	Bediener
Sicherung des Bahnübergangs vorübergehend aufheben (Schranken öffnen)	Einschaltung (im Kontext der Sicherungstechnik: Ausschaltung)	Anmeldung des Öffnungswunsches	Bediener
Erkennen, dass StVTn den BÜ geräumt hat	Gefahrenraumüberwachung	Gefahrenraumüberwachung	Bediener über Wechselsprechanlage (nur, was durch Hören erkannt wird)
StVTn signalisieren, dass Schranken geschlossen werden	Ausschalten (im Kontext der Sicherungstechnik: Einschaltung)	Querungserkennung zur Aktivierung des Schrankenschließens	akustische Warnung von Bediener über Wechselsprechanlage
Schließen der Schranken einleiten	Ausschalten (im Kontext der Sicherungstechnik: Einschaltung)	Bahnübergang sichern	Bediener
BÜ sichern	Freigabe (im Kontext der Sicherungstechnik: Einschaltung)	Bahnübergang sichern	Schranken
Dem Zug mitteilen, dass BÜ nicht gesichert werden konnte	Überprüfung der Einschaltung bzw. der Einschaltbereitschaft	Informationsweitergabe an den Zug	Bediener über Funk, falls vorhanden auch über Streckensignalisierung

Tabelle 2-4: Funktionen der Anrufschanke

### **Bewertung des Konzepts**

Anrufschraken bilden bei einem Kritikalitäten-Mix mit hohen schienenseitigen und geringen straßenseitigen Anforderungen die optimale Sicherung. Ein Infrastrukturvorteil den die Anrufschrake gegenüber anderen BÜSA auszeichnet, ist die geringe erforderliche Straßenbreite. Da sich begegnende Straßenverkehrsteilnehmer vor Schrankenöffnung erkennen können und die Reihenfolge der Querung selbst bestimmen, muss nicht davon ausgegangen werden, dass mehrere Straßenfahrzeuge den Gefahrenraum zu selben Zeit belegen. Darüber hinaus sind diese Bahnübergänge oft die einzigen Zugänge zu Agrarflächen oder Industrie- oder Bahnanlagen, weshalb ein starkes Verkehrsaufkommen nicht zu erwarten ist. Die Überwachung des Gefahrenraums erfolgt bei Anrufschraken durch Hinhören des in einem Stellwerk ansässigen Bedieners über eine Wechselsprechanlage. Aufgrund fehlender Möglichkeiten zum Ersatz dieser Alttechnik besteht derzeit noch Bestandsschutz bei diesen Anlagen. Eine Analyse hinsichtlich der Vor- und Nachteile für den Einsatz der Anrufschrake ergab folgende Bewertung:

#### Vorteile einer Sicherung mit Anrufschrake

- Bei Strecken mit hohem Zugverkehr und niedrigem Straßenverkehr ist es das technisch-betrieblich optimale Sicherungsverfahren, da der Gefahrenraumraum durch den Straßenverkehr nur nach Absprache mit dem Bediener belegt werden kann.
- Der Bahnübergang muss nicht bei jeder Zugfahrt gesichert werden, da die Sicherung nur zu wenigen Querungen aufgehoben wird.
- Anrufschraken erfordern eine nur schmale Straßenbreite, und der daraus resultierende Anteil an Straßenbaukosten ist gegenüber beispielsweise Halbschrakenanlagen als gering einzustufen.
- Die Betriebskosten seitens der Technik sind aufgrund weniger Betriebsstunden im Vergleich zu bei jeder Zugfahrt aktivierter BÜSA niedriger einzustufen. Der Instandhaltungsaufwand ist ebenso geringer einzustufen, da die Komponenten seltener in Betrieb sind und dadurch einen geringen Duty Cycle (siehe Anhang A.1) aufweisen.

#### Nachteile einer Sicherung mit Anrufschrake

- Anrufschraken entsprechen nicht der sicherungstechnischen Anforderung an eine BÜSA mit Schranken, da diese mit einer Gefahrenraumüberwachung auszustatten sind. Eine Gefahrenraumüberwachung durch Hinhören, wie in diesem Fall realisiert, entspricht nicht dem Stand der Technik, da hier Objekte nicht erkannt werden können und Züge mit Geschwindigkeiten bis zu  $v_{Tfz} = 160 \text{ km/h}$  diesen BÜ befahren.
- Der Gefahrenraum kann nicht nach liegengebliebenen Hindernissen untersucht werden. Dies ist der kritische Zustand bei Anrufschraken und muss beseitigt werden.
- Bei Anrufschraken die abhängig von der Tageszeit oder saisonbedingt mehr Bedienerhandlungen erfordern, wird die Überwachung in Spitzenzeiten zu einer großen Belastung für den Bediener. Das ist aufgrund der zentralisierten Betriebsführung und den damit verbundenen Aufgaben des Bedieners aus betrieblichen und sicherungstechnischen Gründen nicht wünschenswert.
- Die Betriebskosten sind im Vergleich zu automatisierten Anlagen aufgrund des Personalbedarfs hoch einzustufen.

### 2.2.2 Internationale Beispiele

Nachfolgende Sicherungsverfahren sind neben der Anrufschränke mit dem bedarfsgesteuerten Betriebskonzept einer Bahnübergangssicherung ausgestattet:

- [Sch07b] und [VÖV09] beschreiben eine in der Schweiz eingesetzte Bedarfsschränke mit manueller und automatischer Bedienung, die dem Prinzip der Bedarfssteuerung entspricht. Bei der automatischen Bedarfsschränke erfolgt die Anforderung mittels Taster und ohne Bediener. Die Schranken öffnen und schließen automatisch. Eine GFR ist nicht vorgesehen. Die manuelle Bedarfsschränke kann mit mechanischen Schrankenantrieben versehen sein, die z.B. verschlossen sind und durch den Wegbenutzer aufgeschlossen und betätigt werden. Diese Ausführungsform wird vor allem bei privaten Wegen eingesetzt.
- Aus Großbritannien sind drei Typen von BÜSA bekannt, die durch den Straßenverkehrsteilnehmer bedient werden (User Worked Crossing - UWC). Diese nutzen voll abschließende Schranken, die in Grundstellung geschlossen sind [HSE05]. Die drei bekannten Ausführungsformen sind UWC mit kleinen Warnlichtern, wobei die Warnlichter über eine Zugannäherung informieren und UWC mit Telefon sowie ohne Telefon. Die Sicherung wird durch die manuell vom Straßenverkehrsteilnehmer zu bedienende Schranke, die über keine Gefahrenraumüberwachung oder automatisierte Betriebsweise verfügt, erreicht. Der Straßenverkehrsteilnehmer muss sich bei allen Typen selbst vergewissern, ob die Strecke frei ist.
- Bereits in den achtziger Jahren wurde in Deutschland aufgrund der zunehmenden Automation der Betriebsvorgänge die Nachfrage nach einer Automatisierung der Anrufschränke mittels Selbstbedienung aufgezeigt. Durch Endmann wurde eine Selbstbedienungsschränke entworfen und zum Einsatz in die Praxis geführt [SB83]. Hier wurde durch einen Taster eine Öffnung der Schranken ermöglicht. Die Schließung wurde zeitabhängig durchgeführt. Eine Rückkopplung zum Triebfahrzeugführer war nicht vorgesehen. Eine Gefahrenraumüberwachung zur Hinderniserkennung war nicht Bestandteil des Sicherungsverfahrens, weshalb sich dieses Konzept nicht durchsetzen konnte.

## 2.3 Hinderniserkennung im Gefahrenraum

An Bahnübergängen mit Schranken (V oder HH) sind bezogen auf andere BÜSA-Konzepte (z.B. H) die wenigsten Unfälle zu verzeichnen (vgl. [SS06], [ES06]). Schranken erfüllen die Forderung nach höchster Sicherheit am wirksamsten, da diese im Normalfall nicht umfahren oder umgangen werden können [Bre01]. Da im Umkehrschluss Straßenverkehrsteilnehmer zwischen den Schranken eingeschlossen werden können, muss dort sichergestellt werden, dass keine Hindernisse (Fahrzeuge, Personen oder andere Objekte) unentdeckt bleiben. Nach EBO (§11, Absatz 16) ist deshalb beim Einsatz von Schranken eine Gefahrenraumüberwachung erforderlich. Um den Gefahrenraum zu überwachen, werden Bediener oder technische Gefahrenraumfreimeldeanlagen (GFR) eingesetzt.

Durch die unmittelbare Sicht eines Bedieners auf den Bahnübergang ist in Deutschland nicht-technisch eine Gefahrenraumüberwachung durchführbar. Ist die direkte Sicht nicht möglich,

wird diese mittelbar durchameratechnik (z.B. Closed Circuit Television - CCTV) hergestellt (vgl. [DB08a]). Einzig bei Anrufschranken ist das Überwachen des Gefahrenraums durch Hören eines Bedieners realisiert, was aus sicherungstechnischer Sicht einen Anachronismus der LST darstellt. Der Einsatz vonameratechnologien dient in Deutschland derzeit ohne weitere Bildverarbeitung nur als Hilfsmittel für den Fahrdienstleiter um einen entfernt liegenden Bahnübergang einsehen zu können (vgl. [Lö01], [Wit03]). Vorteil dieses Verfahrens ist die Möglichkeit, zwischen Menschen, Fahrzeugen und anderen Hindernissen unterscheiden zu können; Fehler seitens der Beobachter bergen jedoch ein gewisses Restrisiko, wenn z.B. der zu sichernde Bereich nicht beobachtet wird oder aufgrund der Witterungsverhältnisse nicht beobachtet werden kann. Der Einsatz eines Bedieners wirkt sich darüber hinaus hinsichtlich der Betriebskosten nachteilig auf die LCC aus, weshalb die Bediener zunehmend aus den BÜSA-Konzepten herausgezogen werden.

Laut Ril 819.1210 [DB03] kann in Deutschland eine technische Gefahrenraumfreimeldung (GFR) durch Radarscanner, Laserscanner (vgl. [Sie69]), Infrarotmessung oder Bildvergleichersysteme erfolgen, wobei diese mindestens aus Detektoren, Auswertungseinrichtungen, Schnittstellen und gegebenenfalls mechanischen Ortungshilfen bestehen müssen. Bisher existiert nur eine GFR der Firma Honeywell (vgl. [Hon10]), die dem Lastenheft Gefahrenraumfreimeldung [DB02] entspricht. Diese Radar-GFR (Radar: Radio detection and ranging) detektiert mittels Radar Hindernisse und tastet damit den Gefahrenraum nach erfolgter Schrankenschließung schrittweise ab. Die Tripelspiegel, welche an drei Eckpunkten des Gefahrenraums installiert werden, dienen als Referenz für den zu detektierenden Bereich. Befindet sich ein Objekt darin, wird ein Hindernis ermittelt (vgl. [Lö01], [Bre01]). Nachteilig sind die systembedingten Grenzen des Radars, die zu einer eingeschränkten Funktionalität führen (keine Unterscheidung von Personen, Fahrzeugen oder anderen Gegenständen). Nachteilig ist zudem, dass die Radar-GFR keine kontinuierliche Abtastung vornehmen kann, sondern einen Fächer bildet, der es bei ungünstigen Konstellationen nicht verhindern kann, dass u. U. Objekte zwischen den gefächerten Abtaststrahlen nicht erkannt werden. Weiterhin nachteilig ist, dass Schrankenbäume aufgrund von Reflektionen Fehlalarme auslösen könnten. Aus diesem Grund wird nicht die gesamte Fläche zwischen den Schranken gescannt. Dadurch existiert das Restrisiko, ein Hindernis nicht zu erkennen. Darüber hinaus erkennt dieses System Gegenstände welche kleiner als einen halben Meter sind nicht. Ebenso ist eine differenzierte Freimeldung (Unterscheidung zwischen Hindernis und keinem Hindernis) nicht möglich. Wenn das System nicht zweifelsfrei funktioniert, wird der Gefahrenraum als besetzt gemeldet. Im Endeffekt hemmen die hohen Anschaffungskosten (Investitionsvolumen pro Radar-GFR etwa 50.000 Euro, vgl. [Art06]), zusätzlich zu den o. g. Defiziten, die flächendeckende Einführung.

Eine Analyse von Arthur D. Little [Art06], die im Rahmen des Forschungsprojektes SELCAT (Safer European Level Crossing Appraisal Technology) verifiziert wurde (vgl. [IVA10]), zeigt diverse Technologien auf, die zur technischen Hinderniserkennung weltweit eingesetzt bzw. erforscht werden. Ziel aller dort identifizierten Ansätze ist es, den Gefahrenraum automatisiert zu detektieren. Bekannt sind Lösungen basierend auf Radar (vgl. [Lö01], [Bre01], [Hon10]), Laser imaging detection and ranging (Lidar) (vgl. [FMN07]), Optische Sensoren (vgl. [SH07a]), Induktionsschleifen (vgl. [SH07b]), Ultraschall (vgl. [Art06], [UST06]) und Mikrowellentechnologie (vgl. [SH07a], [UST06]). Nachfolgend werden einige dieser Forschungsansätze zur Hinderniserkennung an Bahnübergängen vorgestellt:

- Im Rahmen von SELCAT wurde eine Studie durchgeführt, bei der gefährliche Situationen am Bahnübergang detektiert werden sollten. [MDD07] beschreibt in diesem Zusammenhang einen Ansatz, bei dem mit Mono-Kameras Video-Sequenzen mit CCTV (Closed Circuit Television) von einem Bahnübergang aufgezeichnet und nachträglich mit einer Bildverarbeitung erweitert wurden. Die Bildverarbeitung wurde mit einer Segmentierung der Vordergrund-Pixel umgesetzt, wodurch Straßenfahrzeuge, die in dem definierten Bereich des Gefahrenraumes zum Stehen gekommen sind, detektiert werden konnten. Dabei konnte festgestellt werden, dass Mono-Kamera-Systeme nicht geeignet sind, um zweifelsfrei zwischen Schattenwurf oder Scheinwerferlicht und einem Objekt zu unterscheiden.
- Ohta [Oht05] führte eine Studie zur Analyse verschiedener Sensoren für den Einsatz zur Hinderniserkennung am Bahnübergang durch. Als Ergebnis dieser Arbeit wird festgestellt, dass ein Stereo-Kamera-System gute Eigenschaften besitzt, um zur Erkennung von Menschen und Fahrzeugen eingesetzt zu werden. Ohta führt in [Oht05] weiterhin praktische Erfahrungen mit optischen Systemen zur Hinderniserkennung im Gefahrenraum in Japan an, welches ein Stereo-Kamera-System zur Objektidentifikation nutzt.
- Von Hiraguri und Sato [HS08] sind weitere Ansätze zur Hinderniserkennung in Japan bekannt. Sie beschreiben u. a. den Einsatz von Laser und Induktionsschleifen zur Hinderniserkennung im Gefahrenraum.
- Aus Israel ist ein Ansatz bekannt, bei dem mit einem Sensorverbund, bestehend aus Induktionsschleifen zur Objekterkennung und einem kamerabasierten optischen System zur Objektverfolgung, der Bereich des Bahnübergangs detektiert und Hindernisse erkannt werden [Eld08]. Der Ansatz beschreibt darüber hinaus die Möglichkeit, Live-Bilder zu einer Leitstelle zu übermitteln.
- [Spi00] beschreibt ein automatisches System zur Gefahrenraumfreimeldung. Es handelt es sich hierbei um einen System-Sensorverbund bestehend aus Laserscanner und einem Stereo-Kamera-System. Der zu überwachende Bereich am Bahnübergang wird per Laser abgetastet, so dass Hindernisse erfasst werden können. Die Kameras zeichnen gleichzeitig die Bildinformationen auf. Dieses System wurde nicht in die Anwendung überführt.
- Im Rahmen des Verbundprojektes KOMPAS (Komponenten Automatisierter Schienenverkehr) wurde u. a. eine automatisierte Hinderniserkennung aus dem fahrenden Zug heraus entwickelt (vgl. [FG06], [FG03]), bei dem der Einsatz von Stereo-Kameras untersucht wurde. Die Herausforderungen waren die Bestimmung des Durchgangsraumes relativ zum Kamerakoordinatensystem und die Erkennung von Hindernissen.
- Das französische Institut national de recherche sur les transports et leur sécurité (INRETS) erforscht die Möglichkeit aus dem fahrenden Zug heraus per Kameratechnologie Gegenstände im Gefahrenraum zu erkennen und den Zug automatisch vor dem Bahnübergang abzubremesen [Kho07].

## Feststellung

Der Bedarf für einen Einsatz technisch unterstützter Gefahrenraumüberwachung ist weltweit vorhanden. Festzuhalten ist, dass bisher nur eine einzige Technologie existiert, die in Deutschland eine Zulassung als GFR zur Hinderniserkennung im Gefahrenraum erhalten hat.

Alternative Konzepte werden weltweit erforscht. Anhand der o. g. Arbeiten scheinen insbesondere optische Systeme (Kamera-Sensoren und dazugehöriger Bildverarbeitungsprogramme) für den Einsatz am Bahnübergang interessant zu sein. Dies scheint darin begründet, dass die Entwicklung der dafür erforderlichen Bildverarbeitungssysteme einen nutzbaren Stand erreicht hat. Insbesondere der Einsatz im Automobilbereich hat in den letzten Jahren zu einer höheren Verfügbarkeit von optischen Systemen zur Hinderniserkennung geführt. Hinzu kommt eine deutliche Steigerung der Rechnerleistung, wodurch Echtzeit-Rechnungen durchführbar sind (vgl. [FG03], [Str06]). Für eine Übersicht sämtlicher Leistungsparameter und Eigenschaften optischer Systeme wird an dieser Stelle auf die Literatur verwiesen (vgl. [MDD07], [Art06], [Oht05], [Ste02], [Ste07], [MK05], [Bör06], [God06], [LFJ01], [Göh02], [Lan05]).

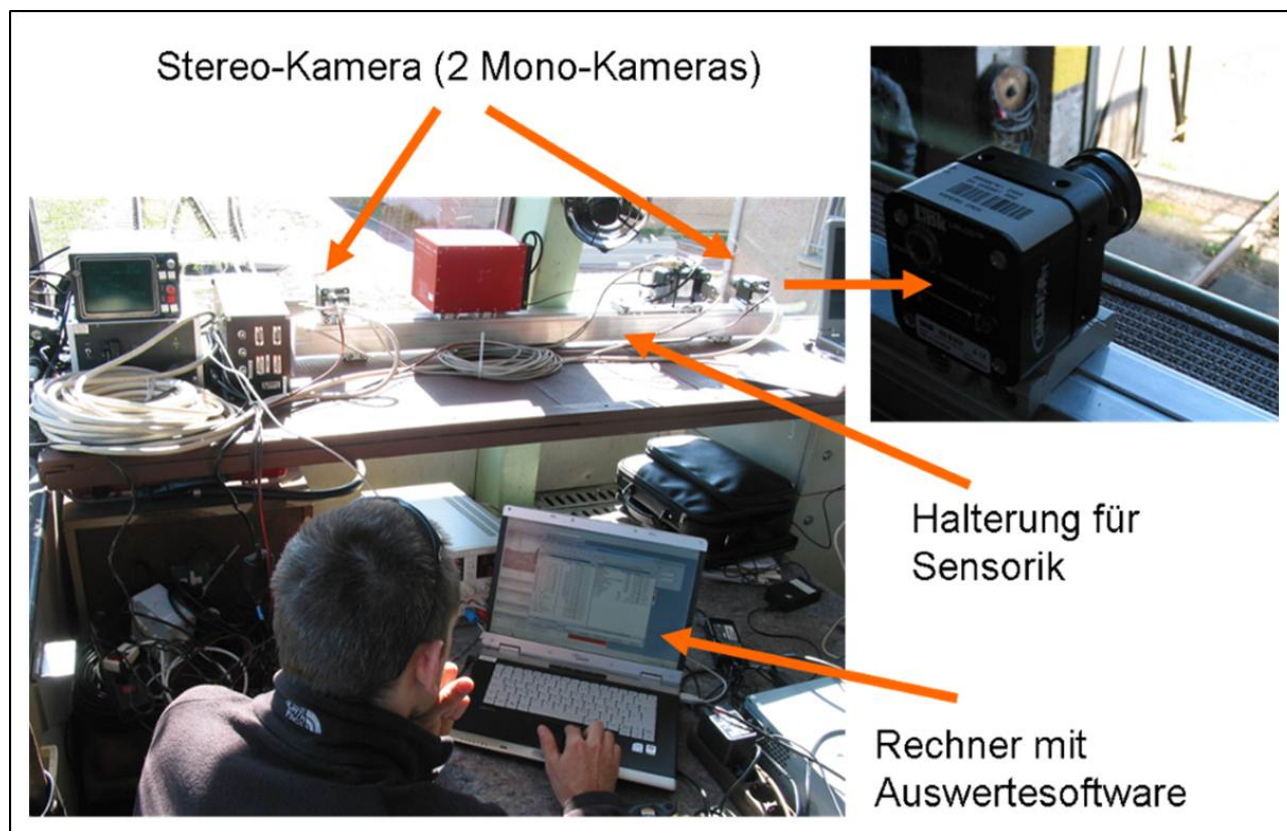
Auch in Punkto Sicherheit wurden entscheidende Fortschritte erzielt, da Kamera-Systeme bei der Überwachung von Produktionsstätten hohe Sicherheitsanforderungen erfüllen [Pil07]. Ein weiterer Vorteil ist die Mehrfachausnutzung der Sensordaten: So kann beispielsweise mit einem Sensorsystem ein Hindernis erkannt und gleichzeitig der Abstand zu diesem bestimmt werden [Win06]. Hinzu tritt die erreichte Serienreife optischer Systeme: dazu zählen u. a. Infrarotsensorsysteme für Ampelanlagensteuerungen und Videokamerasysteme für Staumeldungen (vgl. [KTC09], [SS09], [GH03]). Viele Automobilhersteller führen derzeit den selbstständig Abstand regelnden Tempomaten und automatische Bremsassistenten/-warnsysteme, Systeme zur Hinderniserkennung und zur Spurhaltung mittels optischer Systeme ein, die damit die Entwicklung von Komfort- zu Warn- und Sicherheitssystemen nehmen (vgl. [ART+06], [MH08], [GG05], [FG03], [SSM+07], [RHK+07], [Pai07]). Deshalb sind optische Systeme auch für Anwendungen in der LST interessant.

Kameratechnologien werden im deutschen Bahnbereich bisher zur Fernsehbildübertragung am Bahnübergang, zur Zugabfertigung bei der Hamburger S-Bahn [Mro02], zur Zugschlusserkennung [Mro05] ohne Bildverarbeitung oder zur hochgenauen Lichtraumvermessung [All08] eingesetzt. In einigen Ländern werden Kameras zur Beobachtung der Strecke in Triebfahrzeuge eingebaut und im Betrieb angewendet [Urb08].

In [Hul06] beschreibt Hulin ein System zur kamerabasierten Hinderniserkennung im Durchgangsraum des Stromabnehmers. Für die Detektion von Hindernissen in der Oberleitung während der Fahrt aus dem Zug heraus wurden drei Kameras an die Zugfront montiert, wobei hier jeweils zwei Kameras in der Lage sind die Hindernisse zu erkennen. Dieser Ansatz zeigt die Leistungsfähigkeit kamerabasierter Lösungen für den Einsatz im Bahnumfeld besonders deutlich auf.

Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) entwickelt ein System zur Vermeidung von Kollisionen zwischen Schienenfahrzeugen. Das Railway Collision Avoidance System (RCAS) nutzt unterschiedliche Sensoren, u. a. eine Stereo-Kamera mit aus dem Forschungsumfeld der Robotik stammender Bildverarbeitung zur Erstellung einer dreidimensionalen Tiefenkarte (vgl. [Bör06], [Bör10], [GPB+09]). Das System wird an Bord eines Schienenfahrzeuges

installiert (siehe Abbildung 2-5 [Fotos: Autor]). Die Stereo-Kamera wird durch zwei Mono-Kameras mit CMOS Sensoren (Complementary Metal Oxide Semiconductor) umgesetzt. Die mit diesem System erzeugten Bildpaare liefern die Basis für Algorithmen zur anwendungsbezogenen Bildverarbeitung.



**Abbildung 2-5: Versuchsaufbau für das Stereo-Kamera-System des DLR-Projekts RCAS**

Für die vorliegende Arbeit wird der Ansatz aus [Oht05] als Nachweis der prinzipiellen Einsatztauglichkeit von Stereo-Kamera-Systemen zur Hinderniserkennung am Bahnübergang zugrunde gelegt. Im Verlauf der Arbeit wird auf das Stereo-Kamera-System des DLR zurückgegriffen und aufgezeigt, wie dieses verfahrenssicher eingebunden werden kann, um als Bestandteil einer Bahnübergangssicherung genutzt zu werden.

### 3 Methode zur Auswahl und Bewertung von BÜSA

Ein Hinderungsgrund für die Einführung von neuen Sicherungsverfahren ist ein schwieriger und kostenintensiver Entwicklungsprozess, bei dem am Anfang nie klar ist, ob eine Zulassung für den Bahnbereich erreicht werden kann. Dies steht im Widerspruch zum hohen Bedarf an kurzfristig bereitzustellenden wirtschaftlichen BÜSA-Konzepten (vgl. [Bus07]). Aufgrund der Hürde für die Zulassung innovativer Ideen, werden mitunter als einfach bezeichnete Lösungen nicht weitergetrieben, da der Aufwand für nur einen geringen Nutzen (hier im Sinne von Absatzzahlen) nicht gerechtfertigt scheint.

Eine systematische Bewertung potenzieller BÜSA-Konzepte soll den Nachweis erbringen, ob die jeweils gewählte Optimierungsstrategie (auch unter Einbeziehung innovativer Technologiekonzepte) betrieblich einsetzbar und wirtschaftlich ist. Eine für diesen Zweck geeignete Systematik wird in diesem Kapitel mit der Methode „Auswahl optimierter Bahnübergangssicherungsanlagen“ (AOB) eingeführt.

#### 3.1 Idee: Systematisierung der Entscheidungsprozesse

Die Senkung der Kosten von BÜSA ist einerseits durch eine Anpassung bestehender, andererseits durch neu zu entwickelnde Sicherungsverfahren erreichbar. Ziel muss es jeweils sein, für den spezifischen Fall eine optimale BÜSA zu identifizieren. Über die Erfüllung der funktionalen Anforderungen hinaus, werden deshalb zukünftige Konzepte anhand monetärer und nicht-monetärer Kriterien bewertet. Eine Methodik für die Identifikation optimaler BÜSA würde die Auswahl der Sicherung für einen einzelnen BÜ oder für ein BÜ-Segment unterstützen. Eine Aufgabe besteht daher in der systematischen und nachvollziehbaren Bewertung der Konzepte entsprechend des Spannungsfeldes der Gestaltung optimaler BÜSA: Hohe Sicherheit, geringe LCC und kleinstmögliche Behinderung des Straßenverkehrs stehen der Forderung nach einer hohen Leistungsfähigkeit der Bahnstrecke gegenüber (vgl. Abbildung 3-1).

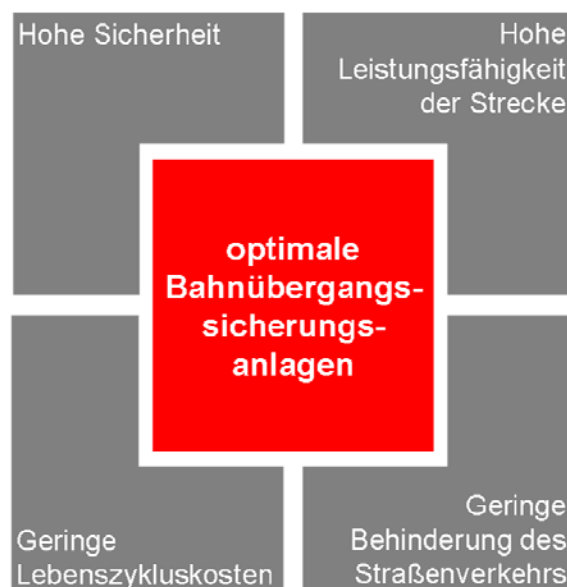


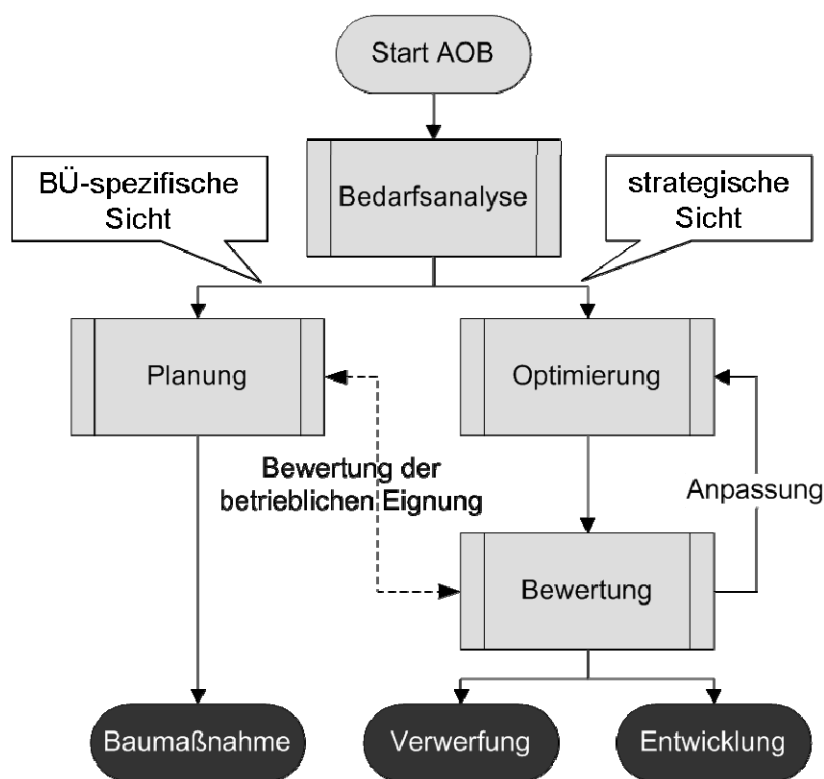
Abbildung 3-1: Spannungsfeld der Anforderungen bei BÜSA



Oft reicht es nicht aus veraltete Komponenten durch moderne Technik oder Technologien zu ersetzen, sondern es entstehen hohe Aufwendungen für den Straßenbau, die aufgrund der Vielzahl zu erneuernder BÜ eine flächendeckende technische Sicherung verhindern. Deshalb ist vor allem auf Nebenstrecken ein Großteil der BÜ nach wie vor nichttechnisch gesichert. Mitunter können die Kosten des Straßenbaus bereits bei der Auswahl einer Sicherungsart reduziert werden indem auch wirtschaftliche Kriterien einbezogen werden.

Sowohl bei der Festlegung von Strategien zur Ausrichtung zukünftiger BÜSA-Architekturen, als auch im operativen Geschäft zur Wahl der optimalen Sicherung eines BÜ stoßen die Entscheidungsträger aufgrund der Komplexität der Auswahlmöglichkeiten an ihre Grenzen. Geeignete Methoden können bei diesen komplexen Entscheidungsprozessen unterstützen. Hierfür haben u. a. Gutsche [Gut10] und Obrenovic [Obr09] Methoden zur systematischen Auswahl von LST eingeführt. Für den Bereich der BÜSA existiert bisher kein Bewertungsverfahren, weshalb bereits im Prozess der Planung von Bauvorhaben oder im Prozess einer Neuentwicklung vermeidbare Kosten entstehen.

Liegen innovative Ansätze für neue Bahnübergangssicherungsverfahren und Technologien vor, muss bereits in der Konzeptphase die zukünftige Praxistauglichkeit nachvollziehbar dargelegt werden. Es muss außerdem sichergestellt werden, dass Entwicklungen nicht im Nachhinein an mangelnder Wirtschaftlichkeit scheitern. Für beide Fälle bedarf es einer Methode, die im Vorfeld Konzepte strukturiert auf ihre spätere Einsetzbarkeit untersucht und als Resultat plausibel darlegt, ob die Entwicklung erfolgsversprechend ist. Die Methode AOB (siehe Abbildung 3-2) bietet für den skizzierten Bedarf Abhilfe, indem sie schon in der Frühphase unter verschiedenen Konzepten das Optimum identifiziert.



**Abbildung 3-2: Systematik des Entscheidungsprozesses**

Während der Bedarfsanalyse wird geprüft, ob für die aktuellen Bedürfnisse an einem BÜ oder für ein BÜ-Segment eine adäquate BÜSA verfügbar ist. Wenn dem so ist, kann mit der Planung begonnen werden (BÜ-spezifische Sicht). Resultiert aus diesem Schritt die Nachfrage nach einer Änderung am Ist-Stand der Technologie bzw. der Sicherungsarten, dann schließen sich die Prozesse der Optimierung und der Bewertung an (strategische Sicht). Dabei werden nicht nur neue Konzepte untereinander verglichen, sondern die AOB stellt den innovativen Ansätzen zudem bestehende, betriebsbewährte Sicherungsarten gegenüber. Mit diesem Vorgehen werden schon in der ersten CENELEC-Phase geeignete von weniger geeigneten Lösungsansätzen separiert.

Mit der Methode AOB werden insgesamt folgende Schritte zur Bewertung von Optimierungsstrategien unter Berücksichtigung möglicher Kostensenkungspotenziale durchgeführt:

- Bestimmung der betrieblich-wirtschaftlich besten Lösung in der Planung
- Betriebswirtschaftliche Bewertung der Konzepte
- Betriebliche Bewertung der Konzepte
- (Sicherungs-) technische Bewertung der Konzepte
- Gesamturteil der Konzepte mittels Portfoliodarstellung

Für den Nachweis der Wirtschaftlichkeit, des Nutzens und der Sicherheit werden bekannte Beschreibungsmittel, Methoden und Werkzeuge eingesetzt, die zum einen aus anderen Bereichen adaptiert und für den spezifischen Anwendungsfall kombiniert werden. Zum anderen wird ein Leitfaden zur Wahl der betrieblich-wirtschaftlich optimalen BÜSA eingeführt. Mit diesem wird den Bahnbetreibern ein Werkzeug an die Hand gegeben, mit dem die Planungen systematisiert und Konzepte hinsichtlich ihrer betrieblichen Eignung verifizierbar werden.

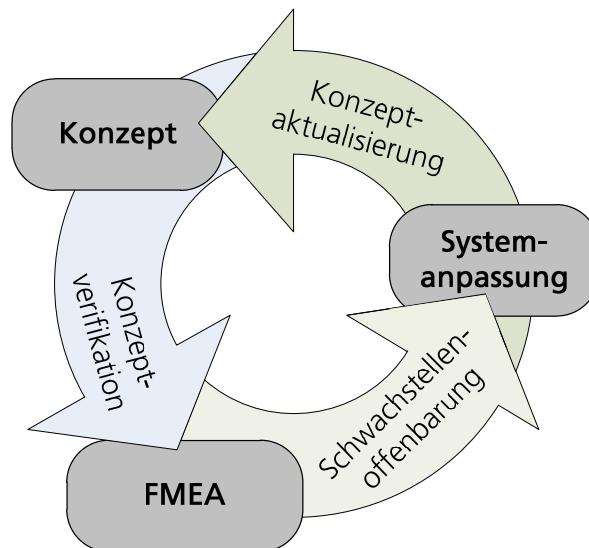
## 3.2 Verwendung bekannter Instrumente

Zur Bewertung von technischen Anlagen werden Instrumente benötigt, mit denen hinsichtlich verschiedener Kriterien aus den Bereichen Kosten, Nutzen, betrieblicher Eigenschaften und Sicherheit Konzepte analysiert und miteinander verglichen werden können. Die Aufgabe eines Bewertungsinstrumentes besteht in der Einstufung von Handlungs- oder Systemalternativen, die anhand der erfüllbaren Anforderungen miteinander verglichen werden können. Anschließend wird durch eine Selektion die zu bevorzugende Systemvariante ermittelt [HBK93]. Dienen dabei ausschließlich Wirtschaftlichkeitsanalysen als Entscheidungsgrundlage, werden dabei die Vorteilhaftigkeiten von Investitionsvorhaben nur aufgrund direkt monetärer Auswirkungen bewertet [Zan00]. Diese Vorgehensweise ist bei neuen, innovativen Ansätzen oder Vorhaben zumeist nicht ausreichend oder aufgrund von fehlenden oder schwer ermittelbaren Kosten nicht durchführbar [Zan00]. Gerade neue Ansätze oder Vorhaben zeichnen sich dadurch aus, dass ihre Auswirkungen oder Folgen zum Teil schwer vorhersehbar und dementsprechend schwer zu bewerten sind. Beschränkt man sich dann nur auf die einfach zu ermittelnden, zumeist monetären Bewertungskriterien, sind einseitige Ergebnisse die Folge, die den wahren Wert eines neuen Vorhabens nur unzureichend widerspiegeln. Erst eine Betrachtung unter Berücksichtigung indirekt monetärer und nicht-monetärer Aspekte führt zu einer optimalen Bewertung [Zan93].

Für eine Methode zur Auswahl und Bewertung von Optimierungsstrategien wird deshalb ein Instrument zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit mit weiteren Instrumenten zur Analyse des Nutzens, der Sicherheit und der betrieblichen Eignung von BÜSA kombiniert. Erst wenn ein neues System unter bahnbetrieblichen und sicherungstechnischen Bewertungsmaßstäben den Anforderungen entspricht, sind eine wirtschaftliche und eine den Nutzen bewertende Analyse anzuwenden. Eine Bewertungsmethodik für die betriebliche Eignung wird nachfolgend entwickelt (siehe Kapitel 3.3). Für die anderen Bereiche kann auf bekannte Verfahren zugegriffen werden:

### Systemsicherheitsanalyse

Für eine erste Analyse der Systemsicherheit eines innovativen Konzepts ist die Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss-Analyse (FMEA) zur qualitativen Offenbarung von Schwachstellen (z.B. Gefährdungen, die durch das System ausgehen bzw. auf das System einwirken können) ein geeignetes Instrument (siehe Abbildung 3-3) [Bra05]. Damit können potenzielle Ausfallarten des Systems, Ansätze zur präventiven Fehlervermeidung, das Auffinden von Schwachstellen und im Ergebnis eine Entwurfsverbesserung bestimmt werden.



**Abbildung 3-3: Einsatzbereich der FMEA in der Konzeptphase**

Im Einzelnen werden folgende Schritte durchgeführt:

1. Aufstellen der Systemarchitektur: Zu Beginn einer FMEA wird das zu untersuchende System klar definiert und abgegrenzt. Das System wird in einzelne Teilsysteme zerlegt. Den Teilsystemen werden Komponenten und Funktionen zugeordnet.
2. Ableitung von möglichen Fehlern: Von den Funktionen werden mögliche Fehler abgeleitet. Typische Fehlerarten sind das Ausbleiben einer Aktion bzw. Information, die Aktionsausführung bzw. Informationserzeugung zur Unzeit sowie der falsche Inhalt einer Information. Die Auflistung der Fehlerarten muss zwingend vollständig sein, d.h. jeder mögliche Fehler muss in der Liste dokumentiert sein. Es wird von Ausfällen einzelner Komponenten ausgegangen, nicht von Ausfallkombinationen.
3. Ursachen und Folgen der Fehlerarten: Für jede der erfassten Fehlerarten werden die Ursachen und resultierende möglichen Folgen dokumentiert sowie die Gegenmaßnahmen berücksichtigt bzw. abgeleitet.

4. Bewertung des Ergebnisses: Eine Fehlerart ist sicherheitsrelevant, wenn aus dem Fehler eine Gefährdung für Personen resultieren kann. Besitzt eine Funktion eine sicherheitsrelevante Fehlerart, ist die zugrundeliegende Funktion selbst sicherheitsrelevant.

### Bewertung des Nutzens

Nutzwertanalysen werden z.B. zur systematischen Vorbereitung von Investitionsentscheidungen eingesetzt. Dazu sind fünf Arbeitsschritte notwendig (vgl. [HBO04]):

- 1) Zielkriterienbestimmung: Bewertungsgrundlage sind einzelne Elemente des Zielsystems. Jedes Zielkriterium sollte eine Messskala besitzen, anhand derer das Erreichen des Kriteriums bestimmt werden kann.
- 2) Zielkriteriengewichtung: Die Zielkriterien können sehr unterschiedlich, je nach subjektiver Einschätzung des Investors, gewichtet werden, der zudem den relativen Nutzen der Teilziele festlegt. Dabei werden Skalierungsverfahren angewandt.
- 3) Teilnutzenbestimmung: Der Teilnutzen entspricht dem Nutzen einer Handlungsalternative für ein Zielkriterium. Um Transparenz zu gewährleisten, geschieht die Bestimmung in zwei Stufen:
  - Messung der Zielerreichung: Anhand der Messskala des Zielkriteriums wird der Zielbeitrag einer Handlungsalternative bestimmt, wobei der Zielbeitrag vom Ausmaß der Erfüllung eines Zielkriteriums durch die betrachtete Alternative abhängt [HBO04].
  - Transformation der Zielerreichung in den Teilnutzen: Der Zielbeitrag wird anhand einer Transformationsfunktion in einen Teilnutzen zwischen null und eins transformiert, d.h. die Zielerreichung wird bewertet.
- 4) Nutzwernermittlung: Der absolute Nutzen für eine Handlungsalternative lässt sich mathematisch beschreiben (siehe Formel 3.1):

$$N_i = \sum_{j=1}^{\bar{j}} n_{ij} \cdot g_j \quad \text{mit} \quad \sum_{j=1}^{\bar{j}} g_j = 1 \quad (3.1)$$

- $N_i$  – absoluter Nutzen für Handlungsalternative  $i$
- $\bar{j}$  – Anzahl der Zielkriterien
- $j$  – Zielkriterium
- $n_{ij}$  – Teilnutzen der Handlungsalternative  $i$  für das Zielkriterium  $j$
- $g_j$  – Gewichtung des Zielkriteriums  $j$

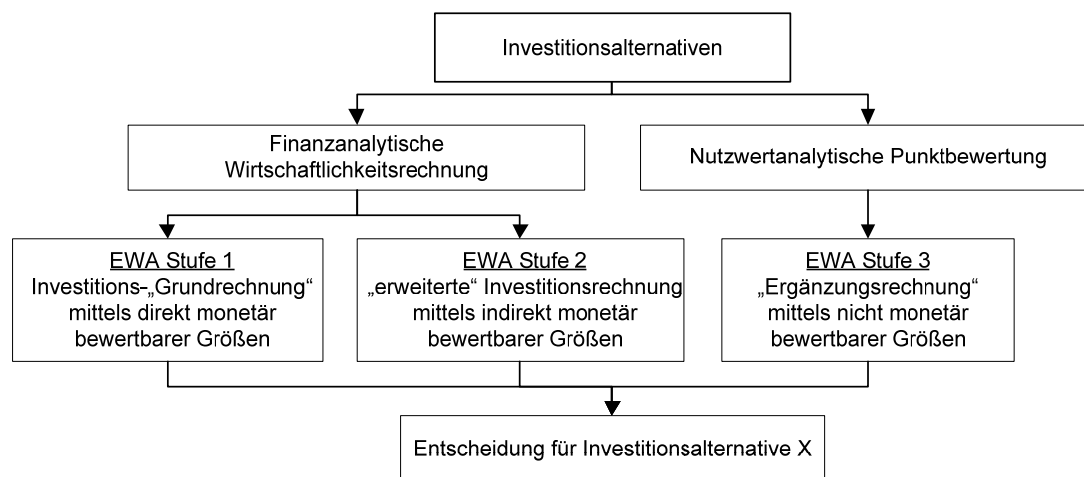
- 5) Beurteilung der absoluten und relativen Vorteilhaftigkeit

Eine Investitionsentscheidung kann dann ganzheitlich beurteilt werden, wenn dem zu erwartenden Nutzen die Kosten eines Vorhabens gegenübergestellt werden. Hierfür bieten sich Wirtschaftlichkeitsanalysen an.

## Bewertung der Wirtschaftlichkeit

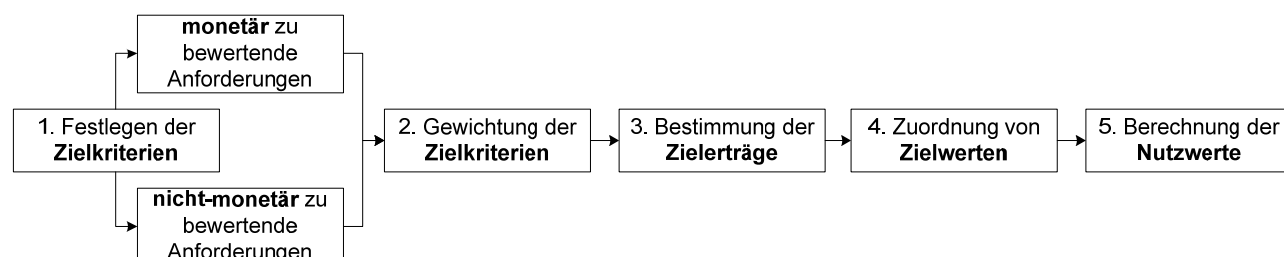
Sowohl Gutsche als auch Obrenovic liefern in ihren Arbeiten [Gut10] und [Obr09] eine umfassende Darstellung der für den Eisenbahnbereich in Frage kommenden Bewertungsmethoden zur bedarfsgerechten Auswahl eisenbahntechnischer Systeme. Wie dort übereinstimmend festgestellt wird, bietet das von Zangemeister [Zan93] beschriebene Verfahren der dreistufigen erweiterten Wirtschaftlichkeitsanalyse (EWA) eine geeignete Basis zur systematischen Bewertung technischer Systeme.

Die Abbildung 3-4 zeigt die Vorgehensweise bei der Durchführung einer EWA. Das 3-Stufen-Verfahren ermöglicht eine systematische Verknüpfung von betriebswirtschaftlich-monetärer Betrachtungsweise mit einer systemorientierten, mehrdimensional ausgerichteten nutzwertanalytischen Bewertung, und verhilft zu einem Einblick in das mögliche finanzielle Risiko der Investitionsentscheidung. Auf der ersten Stufe der EWA werden zunächst alle direkt erfassbaren Kosten bzw. Kosteneinsparungen anhand der jeweiligen Systemalternativen analysiert und bewertet (vgl. [Wat08]). Für den Wirtschaftlichkeitsvergleich werden entweder statische oder dynamische Verfahren der Investitionsrechnung angewendet [Kru07]. Unter Verwendung der gleichen Verfahren werden anschließend auf der zweiten Stufe der EWA die Investitionsauswirkungen der indirekt monetären Kriterien bewertet.



**Abbildung 3-4: Finanzanalytische Wirtschaftlichkeitsrechnung**

Den zu bewertenden monetären und nicht-monetären Anforderungen der Stufen 1 und 2 folgt in Stufe 3 (siehe Abbildung 3-5), beginnend mit der Gewichtung der Zielkriterien, die nutzwertanalytische Punkt- oder Ergänzungsrechnung. In dieser Stufe werden allen Systemvarianten Nutzwerte zugeordnet, um sie anschließend mit den Ergebnissen der Stufe 1 und 2 zu einem Gesamtergebnis zusammenzuführen, sowie die bisher nicht berücksichtigten nicht-monetären Investitionsauswirkungen mit einbezogen.



**Abbildung 3-5: Ablauf der Nutzwertanalyse der Stufe 3**

Die Gewichtung der Bewertungskriterien ist notwendig, da nicht alle den gleichen Anteil am Gesamtnutzen besitzen. Zur Vermeidung zu großer Abhängigkeit unterschiedlicher Interessenseinflüsse seitens des Bewerter, wird dabei auf die Methode des paarweisen Vergleichs zurückgegriffen [Zan93], bei der immer jeweils zwei Kriterien miteinander verglichen werden: Das Kriterium mit der höheren Wichtigkeit erhält eine entsprechend höhere Punktzahl auf einer Skala von null bis vier. Sind zwei Kriterien gleichbedeutend, werden jeweils zwei Punkte vergeben [Wat08]. Die Abbildung 3-6 zeigt die hierfür vorgesehene Punkteskala.

Kriterium 1 : Kriterium 2	Aussage
4:0	Kriterium 1 ist sehr viel wichtiger als Kriterium 2
3:1	Kriterium 1 ist wichtiger als Kriterium 2
2:2	Kriterium 1 und 2 sind gleich wichtig
1:3	Kriterium 1 ist unwichtiger als Kriterium 2
0:4	Kriterium 1 ist sehr viel unwichtiger als Kriterium 2

**Abbildung 3-6: Punkteskala für den paarweisen Vergleich**

Das Ergebnis wird anschließend in Form einer Matrix dargestellt. Ausgehend von der Summe ( $\Sigma$ ) der Zeilensummen ( $x_1$  bis  $x_n$ ) erhalten die Kriterien jeweils Gewichtungen, wobei diese insgesamt 100 % ergeben müssen (siehe Abbildung 3-7).

Kriterien	Vergleich				Priorität	
	Kriterium 1	Kriterium 2	...	Kriterium n	Zeilen-summe	Gewichtung [%]
Kriterium 1		0	..	2	$x_1$	A
Kriterium 2	4		..	3	$x_2$	B
...	..	..		..	...	...
Kriterium n	2	1	..		$x_n$	N
	$\Sigma$					100

Beispiel:  
 $A = 100 * x_1 / \Sigma$   
 $B = 100 * x_2 / \Sigma$   
 $N = 100 * x_n / \Sigma$

**Abbildung 3-7: Struktur der Matrix des paarweisen Vergleichs**

Den einzelnen Systemvarianten werden im nächsten Schritt Zielwerte zugeordnet, durch welche deutlich wird, in welchem Maß die Anforderungen der Kriterien durch die zu vergleichenden Systemvarianten erfüllt werden. Mit Hilfe einer Skala (null bis zehn) werden die Zielwerte vergleichbar gemacht [Zan93]. Eine Null steht dabei für eine sehr schlechte Kriterienerfüllung, eine Zehn für eine sehr gute Kriterienerfüllung und dementsprechend für einen hohen Nutzen. Im Ergebnis wird der Nutzwert ermittelt, der sich aus der Summe aller Ergebnisse (Zielwert multipliziert mit der Gewichtung eines jeden Kriteriums) einer Systemvariante ermittelt wird (vgl. Abbildung 3-8).

Kriterien	Systemvariante 1			Systemvariante 2		
	Zielwert	Gewichtung	Ergebnis	Zielwert	Gewichtung	Ergebnis
Kriterium 1						
Kriterium 2						
...						
Kriterium n						
			Nutzwert			Nutzwert

**Abbildung 3-8: Struktur der Matrix zur Ermittlung des Nutzwertes**

Die abschließende Ergebnisaufbereitung erfolgt üblicherweise in der Form eines Nutzwertportfolios [Sch00]. Die Vorteile liegen in der Anschaulichkeit und visuellen Ergebnisaufbereitung [HHM03], mit der sich auch komplexe Ergebnisse anhand von zwei Abszissen plausibel darstellen lassen. In einem Nutzwertportfolio finden sich auf einer Ordinate die Ergebnisse der Stufen 1 und 2 der EWA in Form der Kostenannahmen wieder. An der anderen Ordinate werden die Ergebnisse der nutzwertanalytischen Punktbewertung abgetragen.

### 3.3 Leitfaden zur Bewertung der betrieblichen Eignung

Der in dieser Arbeit neu entwickelte Prozess zur Bewertung der betrieblichen Eignung wird in der Vorentwicklungsphase einzusetzen sein, um dort die neuen Konzepte entsprechend überprüfen und bewerten zu können. Für diese Art der Bewertung wird ein BÜSA-Leitfaden eingeführt. Damit ist eine Überprüfung eines neuen Systems unter realitätsnahen Einsatzortanforderungen möglich. Die Entscheidung darüber welches Konzept an einem Bahnübergang zum Einsatz kommen soll, kann dadurch auch mit der Frage nach dem betrieblich-wirtschaftlichen Optimum beantwortet werden.

Der Prozess der Entscheidungsfindung zur Bewertung der betrieblichen Eignung von BÜSA ist dabei wie folgt konzipiert (vgl. Abbildung 3-9):

- Phase 1: Auswahl des technisch-betrieblichen Optimums
  - Teil A: straßenseitig
  - Teil B: schienenseitig
- Phase 2: Auswahl des betrieblichen Optimums mit den geringsten Kosten (Teil C)

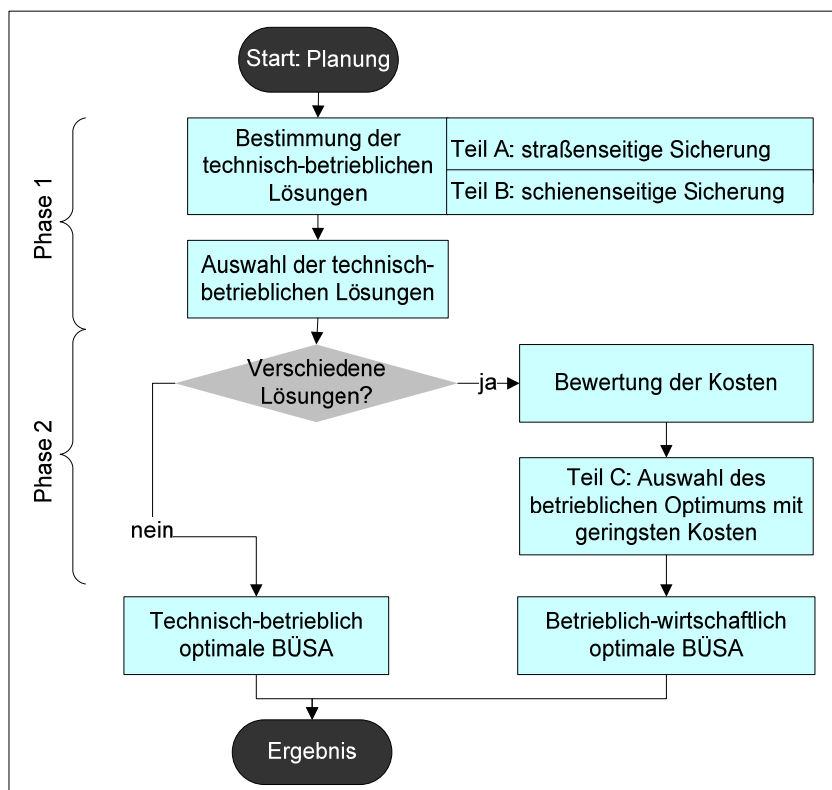


Abbildung 3-9: Auswahl der betrieblich-wirtschaftlich optimalen BÜSA in der Planung

Während die Kriterien zur straßenseitigen Sicherung eines Bahnübergangs in der Literatur beschrieben sind (vgl. [DB08a]), fehlt eine Übersicht zu den Kriterien der schienenseitigen Kombinationsmöglichkeiten. Die im Folgenden betrachteten Einflussgrößen sind für eine Wahl der optimalen Überwachungsart (schienseitige Sicherung) zu berücksichtigen. Es existieren Basiskriterien, die nicht beeinflussbar sind. Dabei handelt es sich um nicht veränderbare Gegebenheiten des Bahnübergangs, wie beispielsweise den Einsatz vollabschließender Schranken. Die beeinflussbaren Basiskriterien hingegen sind zwar durch örtliche Gegebenheiten vorgegeben, können jedoch verändert werden (z.B. ein autarker Betrieb der BÜSA). Die Abhängigkeitskriterien sind nur im Zusammenhang mit einer bei den Basiskriterien getroffenen Auswahl zu setzen. Innerhalb dieser Zuordnung wird nach technischen, betrieblichen, straßenseitigen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten unterschieden. Zwischen einigen Kriterien bestehen technisch-betriebliche Abhängigkeiten, die sich beispielsweise durch Kostenwirkungen ausdrücken lassen. Es bestehen auch unmittelbare Abhängigkeiten zueinander, die betrieblicher oder rechtlicher Art sind. Diese Abhängigkeiten sind im BÜSA-Leitfaden abgebildet und führen letztlich zur optimalen Sicherung für den Untersuchungsraum.

### Phase 1: Auswahl des technisch-betrieblichen Optimums

Zur Bestimmung einer Sicherungsart muss zunächst festgestellt werden, welche unter den rechtlichen Rahmenbedingungen juristisch zulässig ist. Dazu dient Tabelle A.2-1 (siehe Anhang A.2). Hier sind in Abstimmung mit der EBO §11 die Mindestanforderungen an die Sicherung dargestellt. Ist eine technische Sicherung erforderlich, erfolgt eine weitere Auswahl. Der BÜSA-Leitfaden zeigt mittels eines morphologischen Schemas (Adjazenzmatrix) die Kombinationsmöglichkeiten der Kritikalitäten auf (siehe Tabellen 3-2 und 3-3). Mit diesen morphologischen Schemata erfolgt zunächst eine technisch-betriebliche Auswahl.

Ist ein Kriterium durch eine Sicherungsart nicht realisierbar, wird dies mit einer Null (0) gekennzeichnet. Ist eine Sicherungsart besonders sinnvoll, dann wird dies mit einer Zwei (2) dargestellt. Eine Eins (1) symbolisiert die generelle Einsatzfähigkeit der Sicherungsart, weil es entweder keinen Einfluss auf die Technik hat oder weil diese Kombination herstellbar ist. In der Spalte „Auswahl“ wird angegeben, ob ein Kriterium am individuellen Bahnübergang (BÜ) gefordert ist (ja = 1, nein = 0). Neben den straßenseitigen Kriterien, durch die in Teil A eine Vorauswahl stattfindet, werden in Teil B die schienenseitigen Kriterien festgelegt.

Teil A – Straßenseitige Kriterien				Sicherungsart V, HH = Schranke; H = Halbschranke; V(A) = Anrufschränke; Lz = Lichtzeichen			
Nr.	Kriterien	Ausprägung	Auswahl 1 / 0	V, HH	H+Lz	Lz	V(A)
Rechtliche Mindestanforderungen an die Sicherung des BÜ nach Ril 815.0010 Tab 1 und EBO §11 (13)							
1	Hauptbahnen und Nebenbahnen mit schienenseitiger Geschwindigkeit ( $v_{Tfz}$ ) > 160 km/h	Ja / Nein		0	0	0	0
	Hauptbahnen und Nebenbahnen mit $v_{Tfz}$ > 80 km/h	Ja / Nein		1	1	1	1
	Nebenbahnen mit $v_{Tfz} \leq 80$ km/h und Nebengleise mehrgleisig	Ja / Nein		1	1	0	1
	Nebenbahnen mit $v_{Tfz} \leq 80$ km/h und Nebengleise einglisig	Ja / Nein		1	1	1	1



Teil A – Straßenseitige Kriterien				Sicherungsart V, HH = Schranke; H = Halbschranke; V(A) = Anrufschränke; Lz = Lichtzeichen			
Nr.	Kriterien	Ausprägung	Auswahl 1 / 0	V, HH	H+Lz	Lz	V(A)
2	starker Verkehr	Ja / Nein		1	1	0	0
	mäßiger Verkehr, ausgenommen Feld- und Waldwege	Ja / Nein		1	1	0	0
	mäßiger Verkehr auf Feld- und Waldwegen	Ja / Nein		1	1	0	0
	schwacher Verkehr, ausgenommen Feld- und Waldwege	Ja / Nein		1	1	0	1
	schwacher Verkehr auf Feld und Waldwegen	Ja / Nein		1	1	0	1
	Fuß- und Radwege	Ja / Nein		1	1	0	1
	Privatübergänge ohne öffentlichen Verkehr (ÖV) mit $v_{Tfz} > 140$ km/h	Ja / Nein		1	1	0	1
	Privatübergänge ohne ÖV mit $v_{Tfz} \leq 140$ km/h	Ja / Nein		1	1	0	1
	Privatübergänge in Hafen- und Industriegebieten bei schwachem und mäßigem Verkehr	Ja / Nein		1	1	0	1
Straßenseitige Kriterien							
3	Sind Fuß und Radwege Bestandteil der Straße? Ril 815.0032 (5)	Ja		1	1	1	1
		Nein		1	1	1	1
4	Anteil Schwerlastverkehr? Ril 815.0010 (8)	Hoch		1	1	1	1
		Irrelevant		1	1	1	1
5	Ist eine Beleuchtung des BÜ notwendig? Ril 815.0031 (5), 815.0032 (5)	Ja		1	1	1	1
		Nein		1	1	1	1
6	Geringe Breite des BÜ? Ril 815.0030 (2)	Ja		1	1	1	2
		Nein		1	1	1	1
7	Örtliche Besonderheiten wie Schulen, Krankenhäuser etc.? Ril 815.0010 (8)	Ja		2	1	0	0
		Nein		1	1	1	1
8	Ist zukünftig eine Ansiedlung von Gewerbegebieten, Einkaufszentren oder sonstigen, Verkehr erzeugenden Faktoren geplant?	Ja		2	2	0	0
		Nein		1	1	1	1
9	Befindet sich parallel zur Strecke eine stark befahrene Straße? Ril 815.0010 (8)	Ja		2	1	1	1
		Nein		1	1	1	1
Betriebliche Kriterien							
10	Hohe Zugdichte? Ril 815.0010 (8)	Ja		2	1	0	2
		Nein		1	1	1	1
11	Annäherungszeit der Züge Ril 815.0033 (2)	20 - 90 s		1	1	1	1
		26 - 240 s		1	1	0	1
		> 240 s		1	0	0	1
Variable straßenseitige Kriterien							
12	Ist eine Minimierung der Sperrzeiten wünschenswert?	Ja		1	2	2	0
		Nein		1	1	1	1
Straßenseitiges technisch-betriebliches Optimum							

Tabelle 3-1: Teil A – Straßenseitige Kritikalitäten

Teil B – Schienenseitige Kriterien				Überwachungsart ÜS = Überwachungssignal; Fü = fernüberwacht; Hp = Hauptsignal gedeckt; ÜS <sub>OE</sub> = ÜS mit optimierter Einschaltung					
Nr.	Beschreibung der Kriterien	Ausprägung	Auswahl 1 / 0	ÜS	Fü	Hp	ÜS <sub>OE</sub>	Hp/ÜS	Hp/Fü
Nicht beeinflussbare Basiskriterien									
1	<u>Strecke mit technischer Sicherung:</u> Die BÜSA wird auf einer Strecke installiert, die bereits über eine technische Sicherung verfügt.	Ja		1	1	1	1	1	1
		Nein		1	1	0	1	0	0
2	<u>Schnittstelle zum Stellwerk:</u> Es befindet sich bereits eine Schnittstelle zum Stellwerk, z. B. aufgrund einer vorhandenen Altanlage.	Ja		1	2	2	1	1	1
		Nein		1	1	1	1	1	1
3	<u>BÜ in Stellwerks-Abhängigkeit:</u> Der BÜ befindet sich in direkter Abhängigkeit zu einem Stellwerk und muss diese Abhängigkeit aufrechterhalten.	Ja		0	1	2	0	1	2
		Nein		1	1	1	1	1	1
4	<u>Hauptsignal vorhanden:</u> Ein Hauptsignal kann zur Sicherung des BÜ genutzt werden.	Ja		1	1	1	1	1	1
		Nein		1	1	0	1	0	0
5	<u>BÜ-Nähe:</u> Hier sind alle BÜ gemeint, die sich in der Nachbarschaft des betrachteten BÜ befinden. Dabei kann die Entfernung zu den benachbarten BÜ variieren.	Nein		1	1	1	1	1	1
		Ja, nichttechn. Sicherung		1	1	1	1	1	1
		Ja, technische Sicherung		1	1	1	1	1	1
6	<u>BÜ-BÜ-Abhängigkeit erforderlich:</u> Es ist erforderlich, das benachbarte BÜ in Abhängigkeit zueinander gesetzt werden müssen.	Nein		1	1	1	1	1	1
		Fü		0	1	1	0	0	1
		ÜS		1	0	1	1	1	0
		ÜS <sub>OE</sub>		1	0	1	2	1	0
		Hp		1	1	1	1	1	1
		Hp/ÜS		1	0	1	1	1	0
7	<u>BÜ befindet sich im Durchrutschweg</u>	Ja		0	0	1	0	1	1
		Nein		1	1	1	1	1	1
8	<u>Streckenhöchstgeschwindigkeit:</u> Der BÜ für den die BÜSA eingerichtet wird, befindet sich auf einer Strecke, bei der die Höchstgeschwindigkeit a, b, c oder d zulässig ist.	a) 60 km/h		1	1	1	1	1	1
		b) 80 km/h		1	1	1	1	1	1
		c) 120 km/h		1	1	1	1	1	1
		d) 160 km/h		1	1	1	1	1	1
9	<u>Anzahl der Gleise</u>	Eingleisigkeit		1	1	1	1	1	1
		Mehrgleisigkeit		1	1	1	1	1	1
10	<u>Schrankenanlage mit Vollabschluss erforderlich</u>	Ja		1	0	1	0	1	0
		Nein		1	1	1	1	1	1
11	<u>BÜ auf einer Strecke, diese parallel zu stark befahrener Hauptstraße:</u> Befindet sich eine Hauptstraße (z.B. Bundesstraße) parallel zu den Gleisen und eine gering frequentierte Straße zweigt von der Bundesstraße über einen BÜ ab, so sind hier ggf. gesonderte Maßnahmen zu treffen.	Ja		1	1	1	1	1	1
		Nein		1	1	1	1	1	1
Beeinflussbare Basiskriterien									
12	<u>BZ-Tauglichkeit:</u> Die einzusetzende BÜSA kann im Zuständigkeitsbereich einer BZ betrieben werden bzw. der Einsatz in einer zentralisierten Betriebsführung ist mit diesem BÜ sinnvoll und ohne zusätzliche Aufmerksamkeit durch den Fahrdienstleiter möglich..	Ja		1	0	1	1	1	0
		Nein		1	1	1	1	1	1
13	<u>Autarker Betrieb wünschenswert:</u> Autarker Betrieb ist z.B. erforderlich, wenn kein Stellwerk verfügbar ist.	Ja		2	0	0	2	0	0
		Nein		1	1	1	1	1	1

Teil B – Schienenseitige Kriterien				Überwachungsart ÜS = Überwachungssignal; FÜ = fernüberwacht; Hp = Hauptsignal gedeckt; ÜSOE = ÜS mit optimierter Einschaltung					
Nr.	Beschreibung der Kriterien	Ausprägung	Auswahl 1 / 0	ÜS	FÜ	Hp	ÜSOE	Hp/ÜS	Hp/FÜ
14	<u>BÜ in Stellwerksabhängigkeit setzen:</u> <i>Im Gegensatz zu einer autark arbeitenden BÜSA wird hier eine Schnittstelle bzw. Verbindung zu einem Stellwerk benötigt.</i>	Ja		0	1	1	0	1	1
		Nein		1	0	0	1	0	0
15	<u>Überwachung der Einschaltung erforderlich</u>	Ja		1	0	0	1	1	0
		Nein		1	1	1	1	1	1
16	<u>Überwachung der Einschaltbereitschaft erforderlich</u>	Ja		0	1	0	1	0	1
		Nein		1	1	1	1	1	1
Abhängigkeitskriterien									
17	<u>BÜ-BÜ-Kette herstellen:</u> <i>Es ist sinnvoll benachbarte BÜ miteinander bzgl. Ausrüstung (z.B. Einschaltkontakt) zu verbinden. Hohes Kostenreduktionspotenzial.</i>	Ja		1	1	0	1	1	1
		Nein		1	1	1	1	1	1
18	<u>Einsatz bei ETCS<sup>1</sup> gewünscht:</u> <i>Sollte die Strecke mit ETCS ausgerüstet sein, stellt sich die Frage, ob die BÜSA mit ETCS kompatibel ist.</i>	Ja		1	0	1	0	1	0
		Nein		1	1	1	1	1	1
19	<u>Schließzeiten am BÜ:</u> <i>Kürzere Schließzeiten am BÜ steigern die Akzeptanz und optimieren den Verkehrsfluss. Eine Verkürzung ist auch aus betrieblichen Gründen günstig.</i>	möglichst gering		1	1	0	1	1	1
		irrelevant		1	1	1	1	1	1
Schienenseitiges technisch-betriebliches Optimum									

Tabelle 3-2: Teil B – Schienenseitige Kritikalitäten

## Phase 2: Auswahl des betrieblich-wirtschaftlichen Optimums

Einige Kriterien sind dergestalt voneinander abhängig, dass sich dies in den Kosten der Wirtschaftlichkeitskriterien widerspiegelt. Die Wirtschaftlichkeitskriterien werden dann relevant, wenn nach der Auswahl durch die vorhergehenden Kriterien mehrere Lösungen zur Verfügung stehen. In diesem Fall erfolgt eine Entscheidung aus wirtschaftlichen Bewertungsmaßstäben. Dieses Vorgehen für die Auswahl des betrieblich-wirtschaftlichen Optimums wurde erstmals in [LP09] beschrieben und in Expertenrunden gemeinsam mit Betreibern und Herstellern für geeignet bewertet.

Die zentrale Herausforderung besteht in der Ermittlung der jeweiligen Werte für die Gewichtung eines Kriteriums  $g_j$  und des Nutzenfaktors  $n_{ij}$  einer Überwachungsart bzw. des proportionalen Kostenfaktors  $k_{ij}$ . Die Gewichtung  $g$  wird folgendermaßen ermittelt: Die Gesamtkosten der jeweiligen Kriterien werden addiert (siehe Tabelle 3-3), die Summe auf 100 % gesetzt und mit 1 angegeben. Zu den Elementen der Kriterien wird der zugehörige Prozentsatz eingetragen, der damit die Gewichtung  $g$  des Elements darstellt.

<sup>1</sup> ETCS (European Train Control System) ist das einheitliche europäische Zugsicherungssystem (vgl. [FNT03])



Für die jeweils benötigten Elemente  $j$  werden die Stückkosten  $k_j$  ermittelt und der Gesamtkostenberechnung zugrunde gelegt (siehe Formel 3.2). Die Anzahl der benötigten Elemente  $j$  bei der Überwachungsart  $i$  wird durch die Menge  $m_{ij}$  angegeben. So wird über  $m_{ij}$  beispielsweise erfasst, wie viele Einschaltkontakte benötigt werden. Der Menge an Elementen  $m_{ij}$  gegenüber steht der Nutzenfaktor  $n_{ij}$ . Dieser gibt die Anzahl an nutzbarer Alttechnik eines Elements  $j$  bei der Überwachungsart  $i$  an. Damit kann beispielsweise die Anzahl der verwendbaren Einschaltkontakte aus der Alttechnik angegeben werden. Stehen verschiedene Kriterien  $j$  alternativ zueinander, werden sie über die Entscheidungsvariable  $Y_j$  aktiviert oder deaktiviert, indem der Wert auf 1 oder 0 gesetzt wird. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn zwischen den Szenarien der Teilerneuerung oder des Neubaus entschieden wird.

$$K_i = \sum_j k_j ((m_{ij} - n_{ij}) Y_{j, \text{Szenario}} + m_{ij} (1 - Y_{j, \text{Szenario}})) \quad (3.2)$$

- $K_i$  – Kosten einer Überwachungsart  $i$
- $k_j$  – Kosten des Elements  $j$
- $m_{ij}$  – Menge des Elements  $j$ , benötigt für die Überwachungsart  $i$
- $n_{ij}$  – Menge der nutzbaren Altelemente  $j$  einer Überwachungsart  $i$
- $Y_{j, \text{Szenario}}$  – 1, wenn das Szenario einer Teilerneuerung betrachtet wird, sonst 0
- $i$  – Laufindex der Überwachungsarten
- $j$  – Laufindex der Elemente

Um eine Entscheidung objektiv, nachvollziehbar und systematisch zu gestalten, bietet sich das Instrument der Nutzwertanalyse besonders für eine Bewertung der Besitzkosten (Besitzkosten sind alle Kosten, die dem Besitzer der Anlage im Lebenszyklus dieser anfallen) und eine Betrachtung der möglichen Synergieeffekte mit benachbarten Bahnübergängen an.

Bei den Wirtschaftlichkeitskriterien erfolgt die Gewichtung in der Tabelle 3-3 untereinander. Somit können durch den Kostengewichtungsfaktor  $G$  Kriteriengruppen Investition, Betriebskosten und BÜ-BÜ-Kette miteinander verglichen werden. Durch den Kostengewichtungsfaktor  $g_j$  werden Einzelkriterien bzw. Elemente der Überwachungsarten  $j$  innerhalb einer Kriteriengruppe untereinander gewichtet, beispielsweise die Einzelkriterien Personal- und Wartungskosten innerhalb der Kriteriengruppe Besitzkosten. Sie stellen die konkretisierten Unterziele der Kriteriengruppen dar. Die Wirtschaftlichkeitskriterien werden jedoch nur dann betrachtet, wenn eine Entscheidung nach den Basis- und Abhängigkeitskriterien noch nicht erfolgen konnte. In diesem Fall wird die Entscheidungsvariable  $X_i$  auf 1 gesetzt, jedoch nur wenn die Überwachungsart zulässig ist, sonst behält sie den Wert 0.

Anhand der durchgeführten Kostenbewertung wird wie folgt die Nutzenbewertung entwickelt: Die Nutzenbewertung  $N$  soll bei steigenden Kosten  $K$  gegen 0 laufen, während der maximale Nutzwert auf 1 normiert ist. So ergibt sich die Transformation (siehe Formel 3.3):

$$N \sim \lim_{K \rightarrow \infty} \left( \frac{1}{1 + K} \right) = 0 \quad \text{bzw.} \quad \lim_{K \rightarrow 0} \left( \frac{1}{1 + K} \right) = 1 \quad (3.3)$$

Um die Alternativen nun in eine Präferenzordnung zu stellen, werden die einzelnen Nutzwertfaktoren mit der jeweiligen Nutzwertgewichtung multipliziert und anschließend für jede Alternative summiert. Als Summe ergibt sich der bewertete Nutzen einer jeden Alternative (siehe Formel 3.4).

$$N_{i,LCC} = X_i \left[ G_{Invest} \frac{1}{1 + K_i} + G_{Besitz} \sum_j g_{j,Besitz} \frac{1}{1 + k_{ij}} \right] \quad (3.4)$$

- $G_{Invest}$  – Gewichtungsfaktor der Kriteriengruppe der Investitionen
- $G_{Betrieb}$  – Gewichtungsfaktor der Kriteriengruppe der Betriebskosten
- $K_i$  – Kosten einer Überwachungsart  $i$
- $X_i$  – 1, wenn Überwachungsart  $i$  erlaubt, sonst 0
- $g_{j,Besitz}$  – Gewichtung der Kriterien  $j$  in der Kategorie Besitzkosten
- $k_{ij}$  – Betriebskosten des Kriteriums  $j$  für die Überwachungsart  $i$
- $i$  – Laufindex der Überwachungsarten
- $j$  – Laufindex der Elemente und Kriterien

Über den Nutzenfaktor  $n_{ij}$  wird darüber hinaus ausgedrückt, wie sinnvoll eine gemeinsame Erneuerung von Bahnübergängen mit verschiedenen Überwachungsarten ist. So kann der Planungsaufwand reduziert werden, wenn zwei benachbarte BÜSA vom selben Typ gleichzeitig erneuert werden, während sich bei einer Kombination unterschiedlicher Typen keine Synergien ergeben würden. Da dies monetär schwierig abzubilden ist, bietet sich hier ebenfalls eine nicht-monetäre Nutzenbetrachtung an. Das Ergebnis dieser Gleichung ist die Summe der Kriterien  $j$  für die Überwachungsart  $i$  (siehe Formel 3.5).

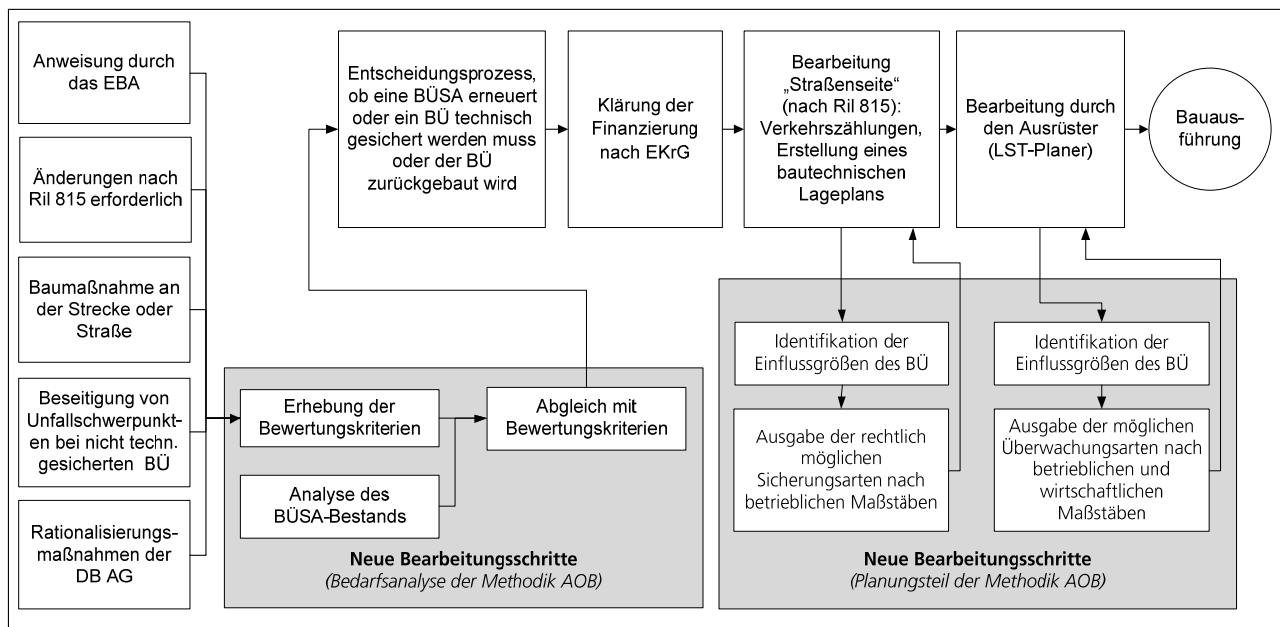
$$\begin{aligned} N_{i,BÜ-BÜ} &= \\ X_i &\left[ G_{Invest} \frac{1}{1 + K_i} + G_{Betrieb} \sum_j g_{j,Betrieb} \frac{1}{1 + k_{ij}} + G_{BÜ-BÜ} \sum_j g_{j,BÜ-BÜ} n_{ij} Y_{j,BÜ-BÜ} \right] \\ \Rightarrow N_{i,LCC} &+ X_i G_{BÜ-BÜ} \sum_j g_{j,BÜ-BÜ} n_{ij} Y_{j,BÜ-BÜ} \end{aligned} \quad (3.5)$$

- $G_{BÜ-BÜ}$  – Gewichtungsfaktor der Kriteriengruppe BÜ-BÜ-Kette
- $g_{j,BÜ-BÜ}$  – Nutzenfaktor einer Überwachungsart  $i$  für Kriterium  $j$ , quantifiziert die Synergieeffekte bei einer BÜ-BÜ-Kette
- $n_{ij}$  – Nutzen der Überwachungsart  $i$  in einer BÜ-BÜ-Kette mit der Überwachungsart  $j$
- $Y_{j,BÜ-BÜ}$  – 1, wenn eine BÜ-BÜ-Kette mit der Überwachungsart  $j$  relevant ist, sonst 0
- $i$  – Laufindex der Überwachungsarten
- $j$  – Laufindex der Elemente und Kriterien
- $l$  – Laufindex der Kriteriengruppen

## Fazit

Der Leitfaden ist mit den zuvor beschriebenen Berechnungsgrundlagen ausgestattet worden, so dass eine Bearbeitung strukturiert und geführt möglich ist. Durch die Gewichtung der Wirtschaftlichkeitskriterien und der eventuellen Überleitung von monetären Größen in Nutzwerte besteht jedoch die Möglichkeit, dass unterschiedliche Nutzer des Leitfadens zu verschiedenen Ergebnissen gelangen. Aufgrund der Dokumentation innerhalb des BÜSA-Leitfadens kann dies allerdings jederzeit nachvollziehbar überprüft und ggf. hinterfragt werden.

Der Vorteil des BÜSA-Leitfadens ist evident: Der Entscheidungsweg, den ein Bearbeiter von der Auftragserteilung bis zur Wahl der Überwachungsart zuvor ausschließlich mit seinem Fachwissen begründen konnte, wird jetzt strukturiert und nachvollziehbar ausgegeben. Hierfür wurden dem bisherigen Prozess „Straßenseitige Planung“ und „Schienenseitige Planung“ weitere Schritte zugeordnet, so dass für jeden Bahnübergang mit einem einheitlichen Prozess vorgegangen werden kann und stets die sowohl straßenseitig und schienenseitig geeignete Sicherung ausgegeben wird (siehe Abbildung 3-10).



**Abbildung 3-10: Prozessmodell für die Planung mit Unterstützung des BÜSA-Leitfadens**

Der Teil A des BÜSA-Leitfadens wurde in einem Expertenkreis bei der DB AG diskutiert und dort als vollständig bewertet. Die Teile B und C wurden in der Praxis durch Bahnübergangsplaner validiert und systematische Fehler konnten ausgeschlossen werden. Der zusätzliche Aufwand bei der Verwendung des Leitfadens ist gering einzustufen, da die Erhebung der örtlichen Randbedingungen bereits heute durchgeführt werden muss und somit eine sinnvolle Unterstützung beigelegt wird. Abschließend ist festzustellen, dass der Leitfaden zur strukturierten Bedarfsanalyse und Planung eingesetzt werden kann. Die Verwendbarkeit wurde durch Betreiberseite bestätigt.

### 3.4 Prozess zur Wahl einer Optimierungsstrategie

Die Systematisierung der Wahl einer geeigneten Optimierungsstrategie für ein Bahnübergangsegment oder eine spezielle BÜSA-Technologie birgt die Chance, neue Ansätze nachvollziehbar zu überprüfen und eine Erfolg versprechende Auswahl zu treffen. Vor allem die Bewertung auf Basis monetärer und nicht-monetärer Kriterien unterstützt die Entscheidung.

Für den Entscheidungsprozess werden drei Schritte eingeführt:

- Prozessschritt (1): Bedarfsanalyse
- Prozessschritt (2): Optimierung
- Prozessschritt (3): Bewertung

Diesen untergeordnet werden verschiedene Teilschritte durchgeführt, denen gemäß dem BMW-Prinzip (vgl. [Sch99]) Beschreibungsmittel, Methoden und Werkzeuge zugrunde gelegt werden. Einige Teilschritte können ohne eine spezielle Systematik umgesetzt werden und bedürfen keiner besonderen methodischen Unterstützung, andere Teilschritte werden durch die zuvor eingeführten Instrumente gestützt.

#### 3.4.1 Bedarfsanalyseprozess

Während des Bedarfsanalyseprozesses (vgl. Abbildung 3-11) wird entsprechend des Untersuchungsgegenstandes eine Kontextanalyse durchgeführt, bei welcher der Optimierungsbedarf herausgearbeitet wird. Im Ergebnis wird festgelegt, ob die weiteren Betrachtungen eher aus einer bahnübergangsbezogenen (weiter mit der Planung eines BÜ) oder strategisch motivierten Sicht (weiter mit den Prozessen der Optimierung und der Bewertung) erfolgen müssen.

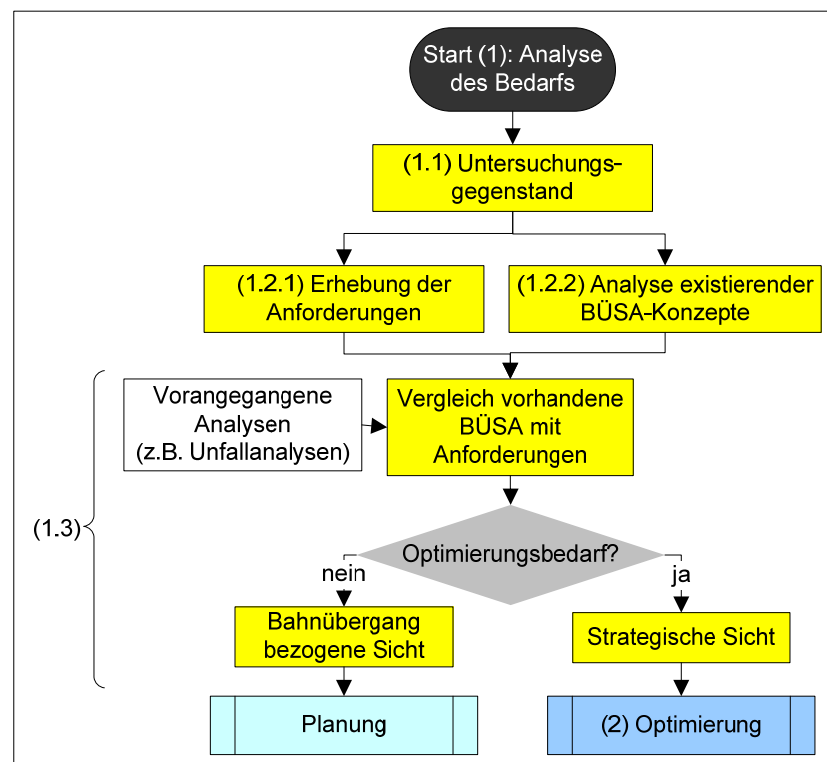


Abbildung 3-11: Prozessmodell der Bedarfsanalyse



### Teilschritt 1.1 Untersuchungsgegenstand

In dieser Phase erfolgt die Festlegung des Untersuchungsraumes, wobei aus jedem Bereich des BÜSA-Zyklus ein potenzielles Optimierungsziel ausgewählt werden kann. Der BÜSA-Zyklus ist der gesamte Lebenszyklus, den eine BÜSA von der Konzeption bis zur Entsorgung durchläuft ohne Unterscheidung in Betreiber- oder Herstellersicht (z.B. Lastenheft- und Pflichtenhefterstellung, Entwicklung, Zulassung, Planung, Bau, Betrieb, etc.). Darauf aufbauend sind die Anforderungen an das zu optimierende Zielsystem aufzustellen.

#### Teilschritt 1.2.1 Erhebung der Anforderungen

Die Erhebung der Anforderungen für die Bestimmung der Bewertungskriterien wird entsprechend des zuvor festgelegten Untersuchungsraums durchgeführt. Mit einem Bewertungskriterium kann die Erfüllung einer Anforderung an ein Element erfasst werden. Dabei wird zwischen monetären und nicht-monetären, sowie quantitativen und qualitativen Kriterien unterschieden.

In diesem Schritt werden die technischen, betrieblichen, rechtlichen und wirtschaftlichen Kriterien an das zu optimierende Ziel-System zusammengetragen. Die Identifikation der relevanten Funktionen ist beispielsweise eine Aufgabe in diesem Teilschritt, welches dann den betrieblichen Kriterien zugeordnet wird.

#### Teilschritt 1.2.2 Analyse existierender BÜSA-Konzepte

In diesem Teilschritt wird der BÜSA-Kontext entsprechend des zuvor festgelegten Untersuchungsraums mittels eines morphologischen Kastens (vgl. Abbildung 3-12) zusammengestellt. Damit wird der aktuelle Bestand dokumentiert und die Zusammenhänge verdeutlicht. Hierbei kommt es im Wesentlichen auf eine vollständige Abbildung aller Sicherungsarten und Kombinationsmöglichkeiten der Komponenten an, die für den speziellen Untersuchungsfall benötigt werden. Ebenfalls sind sämtliche erforderlichen Funktionsträger zur Erfüllung der Funktionen zu identifizieren.

Bestandteile Untersuchungsraum		1	2	3	4	5
A	Überwachungsart	Hp	Fü	ÜS	ÜS <sub>OE</sub>	...
B	Barriere am Bahnübergang	V	HH	H	keine	
C	Gefahrenraumüberwachung	Radar-GFR	Visuell (direkt)	Visuell (Video)	keine*	
D	Straßenseitige Sicherung	Andreaskreuz	Lichtzeichen			
E	...					

\* Ausnahme bei Anrufschranken durch Hinhören

**Abbildung 3-12: Beispiel eines morphologischen Kastens im Bereich BÜSA**

Das Werkzeug des zuvor eingeführten BÜSA-Leitfadens basiert auf einem morphologischen Kasten und zeigt die Kombinationsmöglichkeiten der BÜSA-Bestandteile entsprechend des heutigen Stands der Technik auf. Daher ist die Matrix des BÜSA-Leitfadens für die hier durchzuführende Analyse ebenfalls anwendbar.

### Teilschritt 1.3 Ableitung des Optimierungsbedarfs

Die Identifikation des Optimierungsbedarfs erfolgt durch die Analyse der Ausgangssituation anhand des Vergleichs mit vorhandenen BÜSA-Konzepten. Die daraus resultierenden Anforderungen ergeben sich aus den nicht erfüllbaren Kombinationen straßenseitiger und schie-

nenseitiger Kriterien, die mittels des BÜSA-Leitfadens verdeutlicht werden (vgl. Kapitel 3.3). Darüber hinaus können Lücken in den Sicherheitsschichten, die gegebenenfalls durch vorgelegte Unfallanalysen - wie z.B. in [SP07] und [SP08] beschrieben - identifiziert wurden, geschlossen werden. Dies sollte in diesem Schritt berücksichtigt und in die weiteren Betrachtungen eingebunden werden. Bevor beispielsweise ein neues Sicherungsverfahren entworfen wird, muss zunächst geprüft werden, ob bereits eine Sicherungsart existiert, welche die Anforderungen erfüllt. Die festgestellten Defizite im verfügbaren Ist-Stand wirken unmittelbar als Bewertungskriterien für den Optimierungsbedarf (siehe Abbildung 3-13).

Nr.	Bewertungskriterien	Anforderungen an die Sicherung	Bestehende Sicherungsarten			Neue Sicherungsart
			ÜS	Hp	FÜ	
1	Kriterium 1	1 →	1	1	0	1
2	Kriterium 2	1 →	0	1	0	1
3	Kriterium 3	1 →	1	0	1	1
4	Kriterium 4	0	1	1	0	0
5	Kriterium 5	1 →	0	0	1	1
6	Kriterium 6	0	0	0	1	1
:	:	:	:	:	:	:
:	:	:	:	:	:	:
Ergebnis			0	0	0	1

Defizite der bestehenden Sicherungsarten
resultierender Optimierungsbedarf

**Abbildung 3-13: Prinzipskizze des Vorgehens in Teilschritt 1.3**

Werden nicht alle Anforderungen durch die existierenden BÜSA abgedeckt, besteht somit Bedarf zur Optimierung und der Entwicklung einer neuen Sicherungsart. Werden sämtliche Anforderungen durch bestehende Sicherungsarten erfüllt, kann die Planung auf Basis des verfügbaren Bestands durchgeführt werden.

### 3.4.2 Optimierungsprozess

Im Anschluss an die Bedarfsanalyse folgt entsprechend der strategischen Sicht die Optimierung (siehe Abbildung 3-14), welche in vier Teilschritte untergliedert wird.

Innerhalb dieses Prozesses wird das Ziel verfolgt, eine den Bedarf abdeckende Optimierungsstrategie herzuleiten. Hierzu werden Kostentreiber des im Teilschritt 1.1 festgelegten Untersuchungsgegenstandes identifiziert, unter Berücksichtigung alternativer Ansätze (z.B. neue Technologien) Kostensenkungspotenziale ermittelt und darauf aufbauend potenziell Erfolg versprechende Optimierungspfade aufgezeigt.

Das grundlegende Vorgehen der Teilschritte 2.1 und 2.2 ist der Prozesskostenrechnung entlehnt (vgl. [Bey11]) und dort Stand der Technik.

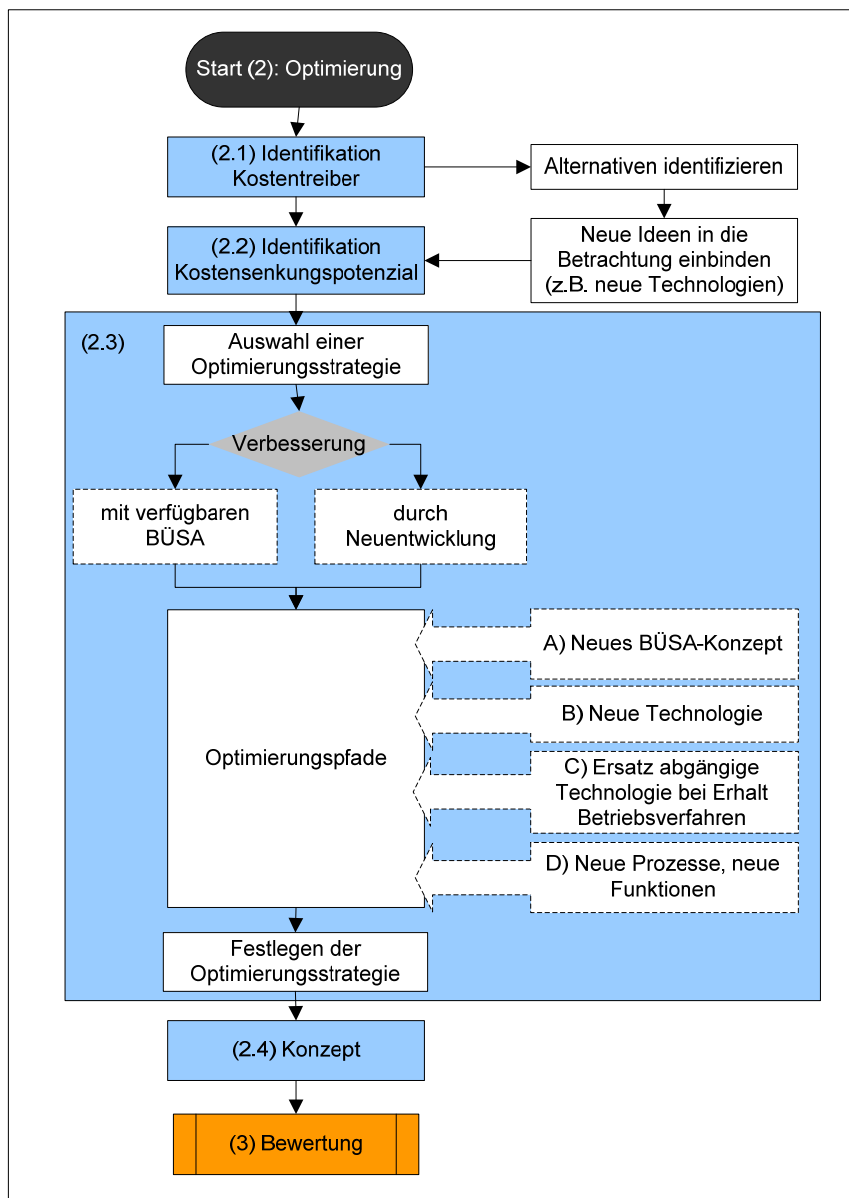


Abbildung 3-14: Prozessmodell der systematisierten Optimierung

### Teilschritt 2.1 Identifikation der Kostentreiber

Die Aktivitäten innerhalb der einzelnen BÜSA-Zyklen verursachen Kosten. Die Durchführung einer Aktivität in einem Gesamtprozess wird in der Prozesskostenrechnung Kostentreiber genannt (vgl. [Bey11]). Die Identifikation der Kostentreiber im BÜSA-Zyklus liefert die Basis zur Reduktion der LCC. Hierfür werden die Bestandteile zunächst den Kategorien (Funktionen, Funktionsträger, BÜ-Prozesse) entsprechend der Merkmale technischer BÜ-Sicherungen zugeordnet. Dann erfolgt eine Unterscheidung der Kostenarten (Personalkosten, Materialkosten, Energiekosten etc.) um eine Vergleichbarkeit zu ermöglichen. Die Angabe absoluter Kostenwerte ist hierfür nicht erforderlich, da die Verhältnisse der Kostentreiber zueinander ausschlaggebend sind.

Daran anschließend erfolgt die Erfassung der Häufigkeit der Nutzung und entsprechend das Auftreten der anfallenden Kosten. Abschließend werden die einzelnen BÜSA-Zyklen gewichtet, um eine Beurteilung der Kosten und der Senkungspotenziale im Verhältnis an den Gesamtkosten zu erhalten.

In einem morphologischen Schema (siehe Abbildung 3-15) werden die Kostentreiber erfasst. Dabei sind nicht-monetäre Angaben über die Verhältnisse der anfallenden Kosten ausreichend (bspw. Einschaltkontakt zu Ausschaltkontakt zu Überwachungssignal = 1:1:5). Sie beziehen sich immer nur auf die Verhältnisse innerhalb einer Phase des BÜSA-Zyklus'. Die einzelnen Phasen wiederum werden untereinander gewichtet, wobei die anfallenden Gesamtkosten 100 % ergeben. Es ist also nicht notwendig, monetäre Werte anzugeben. Für jeden Kostentreiber wird dann berechnet, welchen Anteil er an den Gesamtkosten hat.

BÜSA-Zyklus-Phase	BÜ-Prozesse		Funktionen		Funktionsträger		Kostenart			Kosten-treiber	Häufigkeit der Durch-führung	Gesamtkosten pro Kostentreiber	Gewichtung LC Phase	
	Name	Beschrei-bung	Name	Beschrei-bung	Name	Beschrei-bung	Personal	Material	Energie				Hersteller	Betreiber
Lastenheft														
Anforderungsanalyse														
Systemspezifikation														
Herstellung/ Zukauf														
Hardware														
Systemintegration														
Systemtest														
Prüfung & Zulassung														
Planung														
Kauf														
Hardwareprojektierung														
Softwareprojektierung														
Bedienplatzprojektierung														
Interne Prüfung														
Installation														
Dokumentation														
Prüfung und Abnahme														
Bahnübergangsschauen														
Betrieb														
Systempflege														
Upgrade und Softwarepflege														
Inspektion und Wartung														
Instandsetzung														
Ersatz														

**Abbildung 3-15: Struktur des Schemas zur systematischen Ermittlung der Kostentreiber**

### Teilschritt 2.2 Identifikation der Kostensenkungspotenziale

Die Kostentreiber sollen zur Eingrenzung des in den weiteren Schritten zu fokussierenden Betrachtungsbereiches hinsichtlich ihrer Potenziale zur Kostensenkung und zur Umsetzung notwendiger Innovationen im BÜSA-Zyklus untersucht werden. Maßnahmen zur Anforderungsreduktion und zur Vereinfachung von BÜSA-Prozessen sowie Technologien, die zur Senkung der LCC verwendet werden können, sind als Kostensenkungspotenziale zu benennen. Diese werden mittels eines morphologischen Schemas erfasst (siehe Abbildung 3-16).

Es kann dort prozentual angegeben werden, welche Kostenänderungen sich einstellen (z.B. erhöhte Anschaffungskosten und gesenkte Betriebskosten). Die Kostensenkungspotenziale unterliegen vielen Wechselwirkungen, die wiederum unterschiedliche Phasen des BÜSA-Zyklus' oder unterschiedliche BÜSA-Prozesse und Funktionsträger betreffen können.

Darauf aufbauend erfolgt eine Analyse hinsichtlich innovativer Technologien und Verfahren. Die zentrale Frage dabei ist, welche (neuen) Technologien und Produkte dazu geeignet sind, heutige zu ersetzen bzw. zu ergänzen? Analysiert wird mit dem Ziel Kosten zu senken. Die Identifikation potenzieller Innovationen gilt dabei als treibende Kraft. Die Ansätze mit den besten Aussichten auf ein Kostensenkungspotenzial werden dann in die Auswahl in Frage kommender Optimierungsstrategien übernommen.

BÜSA-Zyklus-Phase	Anteil Kostentreiber an Gesamtergebnis	Maßnahmen & Innovation je Kostentreiber		Kosten je Innovation		Kostensenkungspotenzial je Kostentreiber		Auswirkung Kostensenkungspotenzial auf Ergebnis	
		Bezeichnung	Beschreibung	Kosten	weitere Effekte	Potenzial	weitere Effekte	Betreiber	Hersteller
Lastenheft									
Anforderungsanalyse									
Systemspezifikation									
Herstellung/ Zukauf Hardware									
Systemintegration									
Systemtest									
Prüfung & Zulassung									
Planung									
Kauf									
Hardwareprojektierung									
Softwareprojektierung									
Bedienplatzprojektierung									
Interne Prüfung									
Installation									
Dokumentation									
Prüfung und Abnahme									
Bahnübergangsschauen									
Betrieb									
Systempflege									
Upgrade und Softwarepflege									
Inspektion und Wartung									
Instandsetzung									
Ersatz									

Abbildung 3-16: Struktur des Schemas zur Ermittlung der Kostensenkungspotenziale

### Teilschritt 2.3 Bestimmen der Optimierungsstrategie

Mittels Kostentreiber und potenzieller Innovationen konnten mögliche Kostensenkungspotenziale identifiziert werden. Zur Auswahl der geeigneten Strategie ist das Ziel (Verbesserung des Ist-Stands) durch einen geeigneten Optimierungspfad zu beschreiben. Den entsprechenden Pfad gilt es unter diversen Kombinationsmöglichkeiten aus den zuvor identifizierten Bereichen mit Kostensenkungspotenzial auszuwählen. Diese Bereiche werden je Untersuchung individuell festgelegt. Dementsprechend variieren die in Abbildung 3-17 dargestellten Auswahlmöglichkeiten.

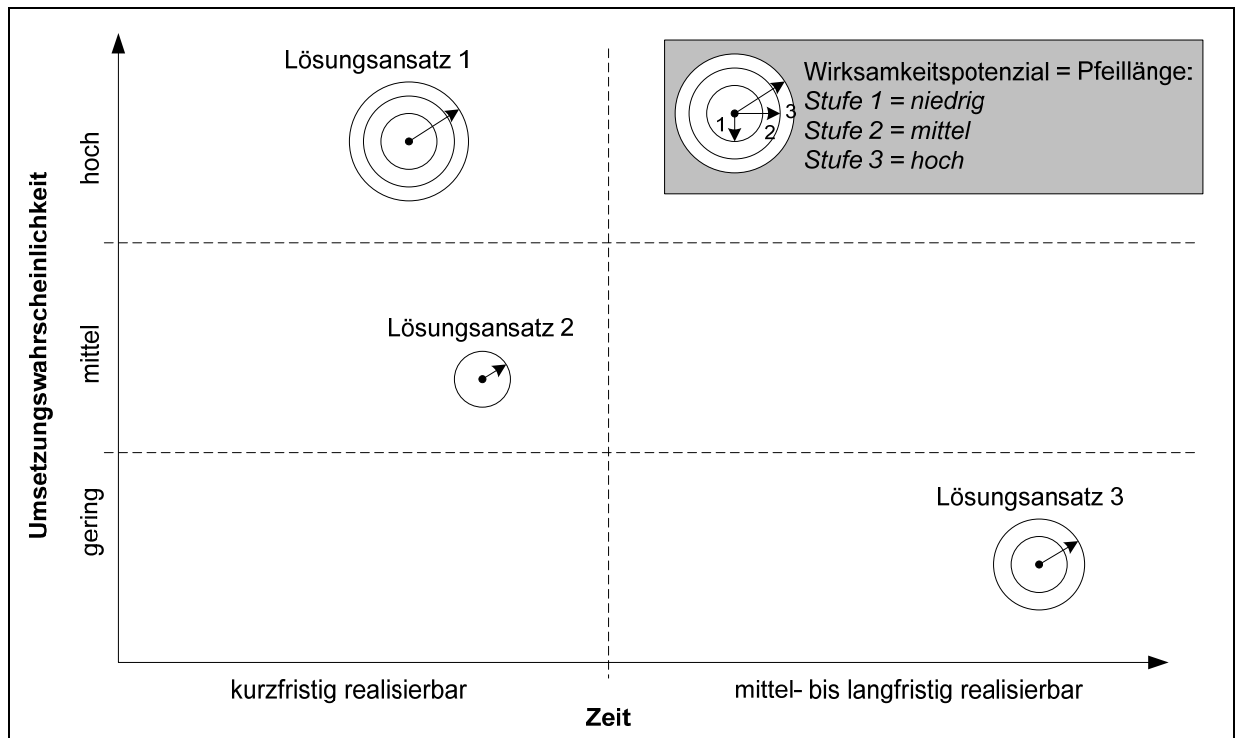
Verbesserung des Bestands	Neues BÜSA-Konzept	Neue Technologie	Ersatz abgängiger Technologie bei Erhalt des Betriebsverfahrens	Neue BÜ-Prozesse	Neue Funktionen	....
Durch Neuentwicklung						
Mit verfügbaren BÜSA-Bestandteilen						
....						

Abbildung 3-17: Struktur der Matrix zur Auswahl des Optimierungspfads

Besteht der optimale Pfad beispielsweise aus der Neuentwicklung einer bahnfremden Technologie, die zum Erhalt eines Betriebsverfahrens beitragen kann, da die verfügbare Technologie als abgänglich zu betrachten ist, sind potenzielle Lösungsansätze durch eine Vorauswahl zu bewerten. In diesem Teilschritt soll es daher auch darum gehen, einen geeigneten technologischen Ansatz auszuwählen mit dem eine Erfolg versprechende Realisierung durchgeführt werden kann. Sollten verschiedene Technologien zur Wahl stehen, werden die zuvor identifizierten Innovationen bewertet und der geeignete Ansatz ermittelt. Dabei sollte die Wahrscheinlichkeit einer praxisnahen Umsetzung ein Bewertungskriterium darstellen. Dies lässt sich

beispielsweise über den Technologie-Reifegrad (Technology Readiness Levels, vgl. [Man95]) bestimmen. Darüber hinaus ist eine Übertragbarkeit auf andere Ansätze für die Ermittlung einzubeziehen.

Die Auswahl erfolgt nach betrieblichen, wirtschaftlichen (monetäre, soweit bekannt und nicht-monetäre) und funktionalen Kriterien. Zusammen ergeben sie das Wirksamkeitspotenzial eines Ansatzes. Anschließend erfolgt die Ermittlung der Umsetzungswahrscheinlichkeit. Dabei muss stets die Zeit für eine Realisierung berücksichtigt werden, also ob etwas kurz-, mittel- oder langfristig umsetzbar ist. Zusammenfassend wird eine Portfolio-Darstellung erarbeitet (siehe Abbildung 3-18).



**Abbildung 3-18: Struktur der Portfoliodarstellung zur Auswahl eines Lösungsansatzes**

Die beiden Führungsgrößen sind dabei die Umsetzungswahrscheinlichkeit und der Realisierungszeitpunkt. Die Führungsgröße Wirksamkeitspotenzial wird in Form einer Kreisfläche dargestellt. Dabei wird den jeweiligen Lösungsansätzen auf einer Skala (hoch; mittel; niedrig) zugeteilt, wie hoch bzw. niedrig die Bedeutung der Erreichbarkeit für die Potenziale bzw. Umsetzungswahrscheinlichkeiten sind.

Letztendlich erfolgt in diesem Teilschritt die Festlegung der Optimierungsstrategie entsprechend den individuellen Vorgaben des jeweiligen Unternehmens.

### Teilschritt 2.4 Konzeption

Als abschließender Teilschritt wird das Konzept erstellt, mit dem ein leistungsstarker und technisch-wirtschaftlich optimierter Verbesserungsansatz verfolgt wird.

### 3.4.3 Bewertungsprozess

Mit dem in fünf Teilschritte gegliederten Bewertungsprozess (siehe Abbildung 3-19) wird erstmals eine Methode eingeführt, Lösungsansätze bereits in der Konzeptphase hinsichtlich

Einsetzbarkeit, Kostenvorteilen und Nutzwerten zu verifizieren und im Ergebnis eine bewertete Handlungsempfehlung für strategische Entscheidungen zu ermöglichen.

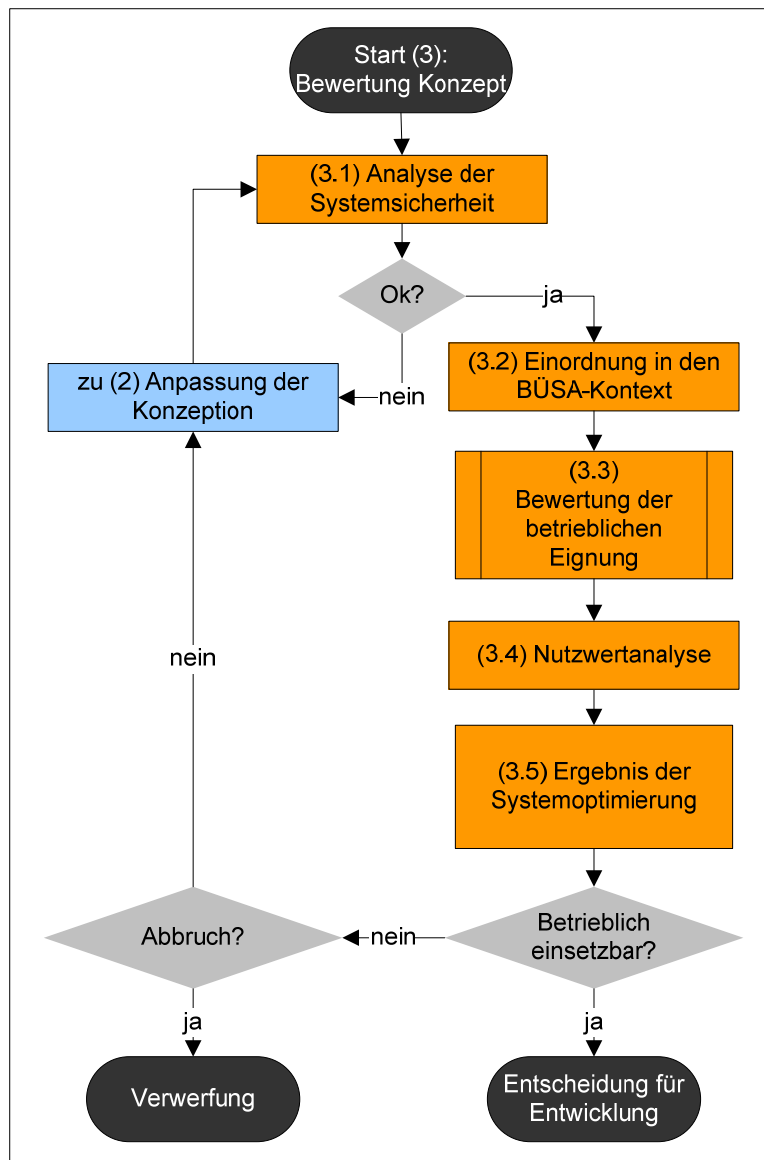


Abbildung 3-19: Ablauf der methodisch unterstützten Bewertung von BÜSA-Konzepten

### Teilschritt 3.1 Analyse der Systemsicherheit

Die Analyse der Systemsicherheit wird mit einer FMEA (vgl. Kapitel 3.2) überprüft. Bei nicht berücksichtigten Gegenmaßnahmen potenziell auftretender Fehler bzw. bei Bedarf der Systemanpassung wird das Konzept überarbeitet. Dieser Schritt wird in der Konzeption durchgeführt. Ist das Ergebnis der FMEA insofern in Ordnung, dass in dieser Phase (Konzept) keine Anpassungen erforderlich sind, wird die Bewertung fortgesetzt.

### Teilschritt 3.2 Einordnung in den BÜSA-Kontext

Bevor die Überprüfung der betrieblichen Eignung durchgeführt werden kann, wird das neue Konzept in den bestehenden BÜSA-Kontext aufgenommen. Dies erfolgt durch Ergänzung des BÜSA-Leitfadens und der Zuordnung der durch die neue Sicherungsart erfüllbaren Anforderungen die aufgrund vorhandener Defizite identifiziert wurden (vgl. Abbildung 3-20). Darüber

hinaus wird an dieser Stelle ein Vergleich zur Alttechnik, die das neue Konzept ggf. ablösen soll, zum Nachweis der Erfüllung der betrieblichen Funktionen durchgeführt.

Nr.	Defizite des Ist-Stands	Anforderungen	Bestehende Sicherungsarten			Neue Sicherungsart
			ÜS	Hp	...	
1	Defizit 1	Kriterium 1	1	1	0	1
2	Defizit 2	Kriterium 2	0	1	0	1
3	Defizit 3	Kriterium 3	1	0	1	1
4	Defizit 4	Kriterium 4	1	1	0	1
:	:	:	:	:	:	:
:	:	:	:	:	:	:
Ergebnis (0 – nicht geeignet, 1 – geeignet):			0	0	0	1

Abbildung 3-20: Vereinfachte Darstellung der Defizite und resultierender Anforderungen

### Teilschritt 3.3 Bewertung der betrieblichen Eignung

Mit dem neu eingeführten BÜSA-Leitfaden für den Planungsprozess (vgl. Kapitel 3.3) wird in diesem Teilschritt die betriebliche Bewertung des Konzeptes durchgeführt. Anhand eines Beispielbahnübergangs für ein spezielles Segment (oder anhand eines konkreten Bahnübergangs für einen bestimmten Optimierungsbedarf) wird mittels der spezifischen Anforderungen an eine BÜSA die optimale Sicherung ausgewählt.

Diese Methodik sieht dabei vor, dass zunächst die Mindestanforderungen an eine BÜSA anhand des BÜSA-Leitfadens ermittelt werden. Für einen Vergleich werden die bisher erfüllbaren Eigenschaften existenter BÜSA und die des neuen Ansatzes in den BÜSA-Leitfaden eingetragen. Im Ergebnis wird das technisch-betriebliche Optimum ausgegeben. Bei mehreren möglichen Sicherungsarten kann auch ein betrieblich-wirtschaftliches Optimum ermittelt werden.

### Teilschritt 3.4 Nutzwertanalyse

Da die Vergleichbarkeit von Kosten u. U. schwierig ist, wird abschließend das neue Konzept hinsichtlich der erweiterten Wirtschaftlichkeit im Vergleich zu bisherigen alternativen Lösungen analysiert. Hierzu wird die in Kapitel 3.2 eingeführte EWA genutzt und wie beschrieben durchgeführt.

### Teilschritt 3.5 Ergebnisdiskussion

Optimale Bahnübergangssicherungskonzepte zeichnen sich dadurch aus, dass sie unter betrieblichen und wirtschaftlichen Aspekten betrachtet individuell je Bahnübergang am besten abschneiden. Das Ergebnis der Untersuchung mit der Methode AOB liefert die Anforderungen an das beste Gesamtkonzept für eine leistungsstarke und wirtschaftliche BÜSA. In diesem Teilschritt wird abschließend zusammengefasst, weshalb der neue Ansatz bzw. das neue Konzept eine Verbesserung gegenüber dem Bestand darstellt.

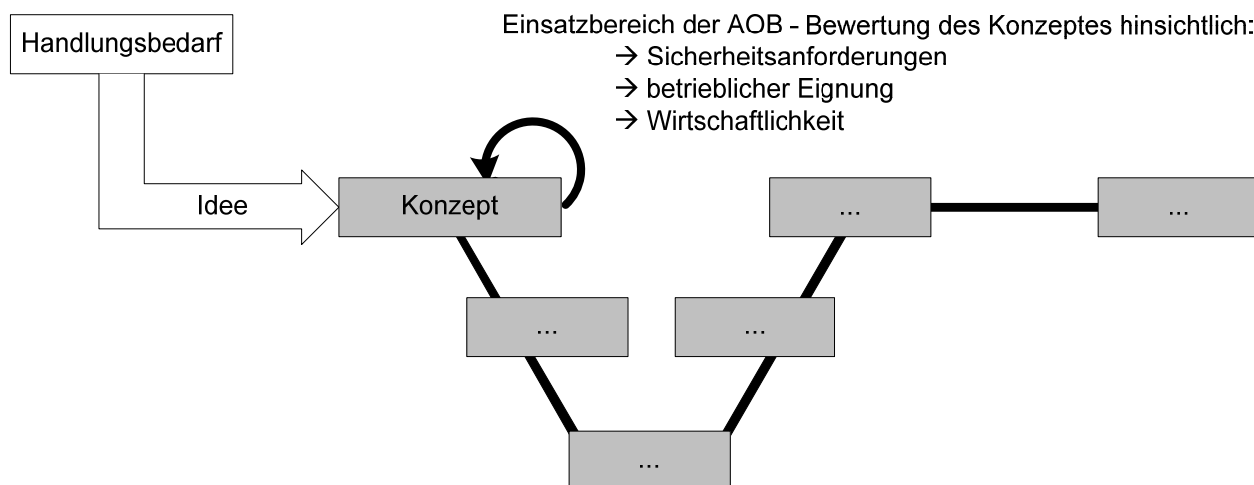
## 3.5 Ergebnis der Methodenentwicklung

Mit Hilfe der Methode „Auswahl von optimierter Bahnübergangssicherung“ (AOB) können Bahnübergangssicherungskonzepte vor der eigentlichen Entwicklung bewertet werden. Die dem Bewertungsprozess vorgelagerten Schritte basieren auf dem allgemeinen Wissensstand



und sind durch das proprietäre Fachwissen durchführbar. Die AOB bietet jedoch hierfür erstmals eine strukturierte Vorgabe. Der Bewertungsprozess hingegen ist bisher nicht aus der Praxis bekannt, weshalb mit der AOB erstmals eine Methode zur Bewertung von BÜSA-Konzepten eingeführt wird. Dabei kommen Instrumente zur Überprüfung der Sicherheit, Wirtschaftlichkeit und betrieblichen Eignung zum Einsatz. Diese Systematik bietet einen direkten Vergleich möglicher BÜSA-Entwicklungen auf Basis festzulegender Bewertungskriterien. Es fließen die Kapitalwerte verschiedener Varianten in Form monetärer Nutzenkriterien in eine Nutzwertanalyse ein und bilden einen Teil einer erweiterten Wirtschaftlichkeitsanalyse. In dieser werden auch weitere Kriterien berücksichtigt. Während die Daten quantitativ beschreibbarer Kriterien nur aus dem proprietären Firmen-Know-how gewonnen werden können, sind qualitativ beschreibbare Kriterien, wie betriebliche, normative und sicherungstechnische Anforderungen auch ohne dieses festzulegen. Dabei ist es auch möglich, innovative Ansätze am „realen Bahnübergang“ hinsichtlich betrieblicher Eignung zu überprüfen. Das Ergebnis der Analyse mit der AOB liefert die Anforderungen an das beste Gesamtkonzept aus den zur Wahl stehenden Ansätzen. Zur neutralen Bewertung aktueller BÜSA-Konzepte hinsichtlich des Kostensenkungspotenzials und zum Nachweis der betrieblichen Eignung neuer Ideen liegt somit erstmals ein methodisches Vorgehen vor.

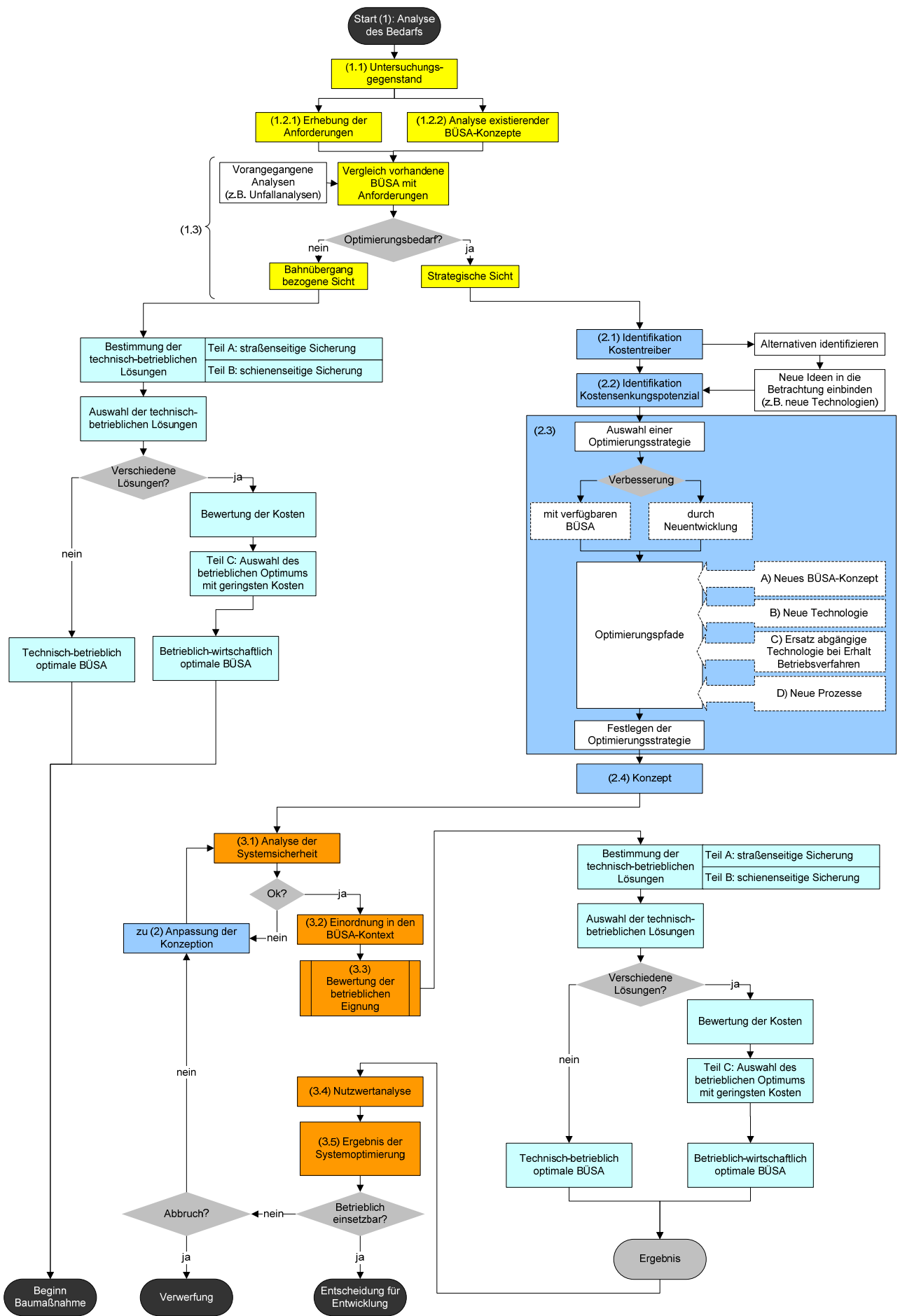
Ist eine Konzeptidee identifiziert worden, wird diese mit der Methode auf ihre Verwendbarkeit hin überprüft werden können. Die bahnspezifischen CENELEC-Normen (vgl. [CEN96], [CEN99], [CEN98]) fordern einen durchgängigen Entwicklungsprozess. Die AOB lässt sich diesbezüglich im V-Modell nach EN 50126 [CEN99] einordnen. Dadurch kann die Methode bereits zur Bewertung in der ersten CENELEC-Phase eingesetzt werden (vgl. Abbildung 3-21).



**Abbildung 3-21: Einordnung der AOB in das V-Modell**

Die AOB hat insgesamt einen Leitfadencharakter, der es dem einzelnen Nutzer ermöglichen soll, individuell Teilschritte zu modifizieren. Die eingeführte Abfolge der Bearbeitungsschritte ist als vollständig zu betrachten (siehe Abbildung 3-21).

In der vorliegenden Arbeit unterstützt diese Methode die Wahl einer geeigneten Optimierungsstrategie für die Ablösung der Anrufschraken. In den nachfolgenden Kapiteln werden hierfür der Bedarfsanalyseprozess und der Optimierungsprozess durchgeführt. Im sechsten Kapitel wird das identifizierte Konzept bewertet.



**Abbildung 3-22: Modell der Methode AOB**



## 4 Ermittlung einer Optimierungsstrategie für Anrufschranken

Für das Segment der Bahnübergangssicherung besteht ein hoher Optimierungsbedarf, der nur gemeinsam von Betreibern, Industrie und Forschung zu bewältigen ist [Bus07]. Ein hohes Potenzial zur Senkung der Lebenszykluskosten (LCC) in diesem Bereich wird u. a. in einer Optimierung von Anrufschranken gesehen (vgl. [Kef09], [Ape09], [Dam10]). Dieses Sicherungsverfahren ist aufgrund verschiedener Defizite zu verbessern, um für einen zukunftsfähigen Einsatz betrieblich erhalten zu bleiben. Hierfür wird derzeit ein neues Lastenheft für Bedarfsgesteuerte BÜSA erstellt (vgl. [DB11]). Für eine adäquate Ablösung der BÜSA-Alttechnik Anrufschranke wird in diesem Kapitel eine Optimierungsstrategie entsprechend des methodischen Vorgehens der AOB ermittelt.

### 4.1 Optimierungsbedarf Anrufschrankenautomatisierung

Eine auf den straßenseitigen Öffnungswunsch reagierende Schrankenanlage ist bei geringem Kritikalitäten-Mix (wenig frequentierte Straße und mäßig bis stark befahrene Schiene) eine höchst effiziente Sicherungsart. Anrufschranken gehören zwar zu den BÜSA mit den geringsten Unfallzahlen (vgl. [SS06], [Sta07]), dennoch entsprechen diese nicht mehr dem Stand der Technik. Gründe hierfür sind die nicht vorhandene Gefahrenraumüberwachung, aber auch mangelnde Integrationsmöglichkeiten in zunehmend zentralisierte Betriebskonzepte.

Erschwerend kommt hinzu, dass die derzeit einzige technische Gefahrenraumüberwachung auf Basis von Radar für den Einsatz bei Anrufschranken nicht berücksichtigt werden kann, da aus heutiger Sicht diese GFR künftig als obsolet zu betrachten ist. Darüber hinaus ist die Radar-GFR nur für den Bereich zwischen den Schranken einsetzbar, was dazu führt, dass weitere Technologien identifiziert werden müssen, mit denen die Erkennung des Querungswunsches erkannt und der Bereich unterhalb der Schranken nach Hindernissen untersucht werden kann. Für diese Funktionen konnte bisher nur der Mensch geeignet eingesetzt werden. Bahnübergänge mit Anrufschranken hemmen somit die Automatisierung von Strecken, welche mit dem Einsatz moderner elektronischer Stellwerkstechnik angestrebt wird. Daher ist die Anrufschranke eine abgängige technische Lösung.

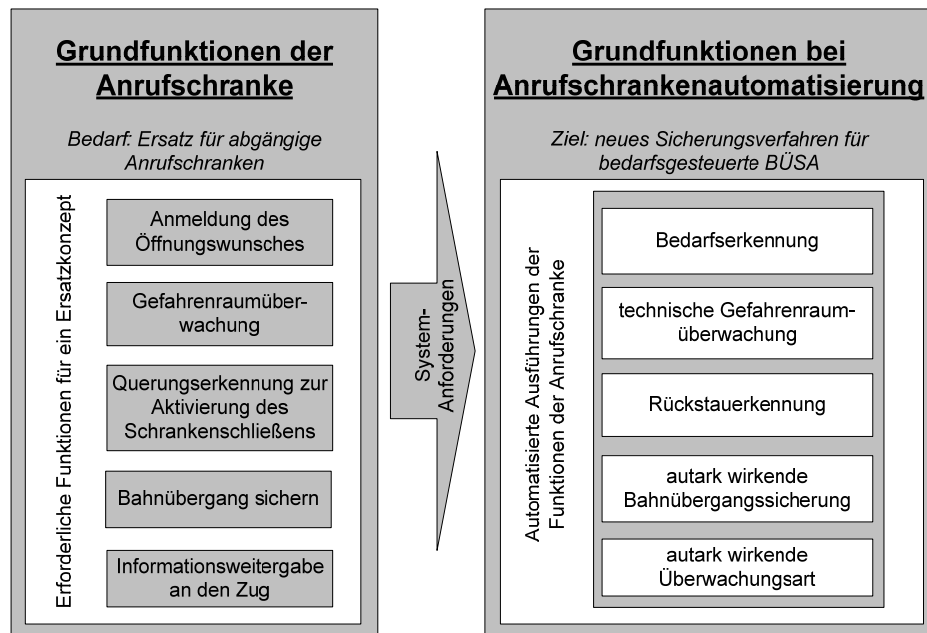
Eine Ablösung der Anrufschranke ist neben dem betrieblich-wirtschaftlichen Bedürfnis der Betreiber auch eine sicherheitstechnische Notwendigkeit (keine Gefahrenraumüberwachung), die entsprechende Anforderungen an eine nach Möglichkeit kosten- und funktionsoptimierte BÜSA implizieren. Die derzeitig favorisierte Alternative ist der Einbau von Halbschrankenanlagen (vgl. [URL03], [URL06]). Die Ablösung durch Halbschrankenanlagen ist jedoch inklusive aller Begleitkosten sehr kostenintensiv. Darüber hinaus existieren einige Bahnübergänge, die aufgrund des bestehenden Kritikalitäten-Mixes heutzutage nicht anders als mit Anrufschranken technisch gesichert werden können. Hieraus lässt sich ableiten, dass die Anrufschranke betrieblich zu erhalten und ein adäquater Ersatz erforderlich ist, sofern dieser weniger kostenintensiv als bestehende Alternativen ist.



Betriebliche Anforderungen an ein Automatisierungskonzept	Beschreibung
Überprüfen, ob Zugposition das Öffnen der Schranken zulässt	Verhindern eines unerlaubten Öffnungsvorganges
Öffnen der Schranken einleiten	Die Schranken sind in Grundstellung geschlossen und werden nur bei Bedarf geöffnet.
Erkennen, dass StVTn im BÜ-Bereich ist	Ermöglicht Schließen der Schranken nach Räumen des GF
Erkennen, dass StVTn zurückstaut	Bei der Ablösung der Anrufschrake ist gegebenenfalls ein sehr umfangreiches Straßenbauprogramm aufzusetzen, um z.B. Abbiegespuren, vorgeschaltete Lichtzeichen etc. zu installieren. Eine Detektion des Straßenverkehrs auf dem BÜ, so dass im Fall einer Belegung bzw. Rückstauung (Straßenverkehr befindet sich noch unterhalb der Schranken oder im GF) auf den BÜ die Schranken nicht gesenkt werden, vermeidet dies. Die Rückstauerkennung dient darüber hinaus der Vermeidung einer unzeitigen Schrankenbaumabsenkung.
StVTn signalisieren, dass BÜ geschlossen wird	Dem StVTn muss das Senken der Schranken angezeigt werden
Schließen des BÜ einleiten	Die Schranken sind in Grundstellung geschlossen und müssen diese Stellung nach erfolgter Querung einnehmen.
Gefahrenraum überwachen	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Verhindert einen Zusammenprall zwischen einem Zug und einem zwischen den Schranken eingeschlossenen StVTn</li> <li>- Bei Einbau einer Schrankenanlage muss eine GFR installiert werden. Aktuell ist bekannt, dass die einzig existente GFR nicht weiter produziert wird und keine Alternative bereitsteht. Aufgrund des Einsatzes von Schranken ist eine automatische Hinderniserkennung im GF zur Gefahrenraumüberwachung Voraussetzung. Von daher muss für die Hinderniserkennung im GF das Radar-GFR genutzt oder ein innovatives System bereitgestellt werden.</li> </ul>
Erkennen, wenn Zug den BÜ passiert hat	Die BÜSA verhindert eine Querung des StVTn solange ein Zug das Einschaltetelement befahren hat. Erst wenn das Ausschaltetelement mit der letzten Achse befahren wurde, hat der Zug den BÜ passiert und die Sicherung kann ausgeschaltet werden.
BÜ sichern	Vermeiden von Kollisionen durch Anhalten des Zuges oder Verhindern einer Schrankenöffnung.
Zug warnen, falls BÜ nicht gesichert	Ermöglicht ein rechtzeitiges Halten eines Zuges vor einem ungesicherten BÜ
Vermeidung der Kollision von StVTn mit sich senkenden Schrankenbäumen	Vermeidung von Beschädigung des StVTn und des Schrankenbaumes
Automatische Überwachung des Schrankenschließens	Ersatz des Bedieners und Umsetzung der Anforderung 18
Geringe Behinderung des parallelen Bundesstraßenverkehrs	Ist eine spezifische Anforderung, die sich aus dem Szenario in Kapitel 3.1 ableiten lässt
Der Einsatz bei ETCS muss ermöglicht werden	Die BÜSA muss mit der Zugsicherung ETCS harmonisieren, d.h. die BÜSA muss auch auf ETCS-Strecken einsetzbar sein. Nach [SRS23] und [SRS30] müssen ÜS oder Hp verwendet werden.
Im Fall einer(s) Störung/Defekts ist ein straßenseitiger Querungsvorgang nicht mehr zu ermöglichen	Verhindert die Benutzung eines ungesicherten BÜ
Vorrang des Schienenverkehrs vor dem Straßenverkehr ermöglichen	Ein Querungswunsch ist dann nicht zuzulassen, wenn sich ein Zug dem BÜ nähert.
Rechtzeitige und eindeutige Warnung des Straßenverkehrs	Der BÜ muss angekündigt werden, so dass die StVTn vor den Schranken zum Stehen kommen können.
Technische Defekte oder Ausfälle müssen sofort entdeckt werden	Wenn eines der Systeme nicht funktioniert, muss die Sicherheit aufrechterhalten werden. Sobald Störungen auftreten, müssen diese schnell erkannt und behoben werden können.
Automatisiertes Öffnen der Schranken	Ersatz des Bedieners

Tabelle 4-1: Betriebliche Anforderungen

Insgesamt ergeben sich somit erforderliche Grundfunktionen bei der Anrufschrakenautomatisierung, die aus den Grundfunktionen der Anrufschrake abgeleitet werden. Dieses Spektrum der betrieblichen und funktionalen Systemanforderungen wird zusammenfassend in Abbildung 4-2 dargestellt und anschließend erläutert.



**Abbildung 4-2: Spektrum der Systemanforderungen**

- Bedarfserkennung – Bedarf zum Queren erkennen und, bei in Grundstellung geschlossener Schrankenanlage, Öffnung der Schranken anfordern.
- Gefahrenraumüberwachung – Aufgrund des Einsatzes von Schranken ist eine automatische Hinderniserkennung im Gefahrenraum (GF) zur Gefahrenraumfreimeldung Voraussetzung. Von daher muss eine GFR eingesetzt werden.
- Rückstauerkennung – Bei der Anrufschränke muss die erfolgte Querung erkannt werden, damit die Schranken gefahrlos gesenkt werden können. Für eine automatisierte Lösung muss die Detektion des Straßenverkehrs im Bereich der Schranken erfolgen, so dass im Fall einer Rückstauung (Straßenverkehr befindet sich noch unterhalb der Schranken oder ragt in den GF) die Schranken nicht gesenkt werden.
- Autark wirkende Bahnübergangssicherung – Die Funktionen der Sicherungsprozesse am Bahnübergang wie Schranken öffnen und schließen automatisiert ausführen.
- Autark wirkende Überwachungsart zur automatisierten Ein- und Ausschaltung der BÜSA – Dies ist nur durch den Wegfall des Bedienpersonals möglich, was den Einsatz einer automatisierten schienenseitigen Überwachung erfordert. Im Idealfall ist diese autark, d.h. ohne erforderliche Einbindung in ein Stellwerk, funktionsfähig.

### **Sicherungstechnische Anforderungen**

Aus den o. g. Anforderungen und den Funktionen resultiert, dass ein technisches System einzusetzen ist, welches die Ausführung der Grundfunktionen ohne den Einsatz eines Bedieners ermöglicht. Daraus folgt die sicherungstechnische Notwendigkeit für den Einsatz einer technischen Gefahrenraumüberwachung und -freimeldeeinrichtung, welche den Nachweis gleicher Sicherheit zum Stand der Technik erbringen muss. Als maßgeblicher Stand der Technik gilt die Radar-GFR. Ausgehend von dieser sehr hohen Anforderung an ein technisches System, soll es ermöglicht werden, weitere Grundfunktionen (Rückstauerkennung und Bedarfserkennung) umzusetzen, die für die Anrufschränkenautomatisierung am Bahnübergang erforderlich sind. Die Radar-GFR ist jedoch für diese Umsetzung nicht geeignet (vgl. Kapitel 2.3).

Insgesamt ergeben sich somit spezifische sicherungstechnische Anforderungen an eine alternative Technologiekonzeption:

- Ein System für unterschiedliche Safety Integrity Level (SIL), wie z.B. Anrufautomatisierung SIL = 0 und GFR SIL = 3, die Gesamtanlage BÜSA jedoch SIL = 4.
- Detektieren aller Hindernisse im GF (z.B. Menschen, Fahrzeuge etc.)
- Differenzierte Detektion der Hindernisse (Unterscheidung hinsichtlich potenzieller oder keiner Gefährdung)
- Erkennen von Hindernissen zwischen, unter und vor den Schranken
- Die Informationen über die Belegung des GF müssen in Echtzeit und hoch verfügbar der BÜSA bereitgestellt werden.
- Rückstauerkennung ermöglichen
- Sich selbst überwachend und bei fehlerhaftem Zustand Fehlermeldung ausgebend
- Vermeidung von Fehlinterpretationen bei der automatischen Bedarfserkennung, wie z.B. Öffnungswunsch erkennen, obwohl keiner besteht
- Interpretation der Zustände zur sicheren Seite (fail safe)
- Erfüllen der Eigenschaften der Radar-GFR gemäß [DB02] und diese verbessern (z.B. Objekte unter 0,5 m erkennen, Hindernisse bis zum Schrankenbaum erkennen)

### Wirtschaftlichkeitskriterien

Aus der Sicht von EIU sind für ein wirtschaftliches System ein minimaler Personalbedarf, niedrige Investitionsausgaben, niedrige Betriebskosten, geringe Instandhaltungskosten und ein geringer Stromverbrauch Voraussetzung. Der Investitionsaufwand bei einer neuen Anlage darf insgesamt nicht wesentlich höher als bei heutigen Anrufschranken ausfallen, die LCC müssen im Vergleich zu heutigen Alternativen (Halbschrankenanlagen, Über- und Unterführungen etc.) konkurrenzfähiger werden.

Vor diesem Hintergrund ergeben sich folgende LCC-Anforderungen (siehe Tabelle 4-2).

LCC-Anforderungen	Erreichbarkeit
Niedrigere Betriebskosten im Vergleich zu heutigen Alternativen	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Wenige Betriebsstunden einer Anlage, nur im Bedarfsfall einschalten</li> <li>- Geringer Stromverbrauch durch Einsatz bedarfsgesteuerter BÜSA, die in Grundstellung ausgeschaltet ist</li> <li>- Minimaler Personalbedarf durch autarke Betriebsweise</li> <li>- Wirtschaftliches Systemdesign ermöglichen</li> </ul>
Niedrigere Investitionsausgaben im Vergleich zu heutigen Alternativen	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Geringere Begleitkosten beim Straßenbau, Landerwerb etc.</li> <li>- Belassung der Wege im derzeitigen Zustand</li> <li>- Geringe Kosten für die einzusetzende Technologien, z.B. durch Einsatz von Industriekomponenten</li> <li>- hohe Funktionalität des Technologiekonzeptes</li> </ul>
Geringere Instandhaltungskosten als bei heutigen Alternativen	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nutzung bewährter Komponenten aus der Industrie für die Grundfunktionen einer BÜSA</li> <li>- Wenige Betriebsstunden der Anlage</li> <li>- Obsoleszenz der Komponenten berücksichtigen und möglichst unabhängig von Sensoren sein (Sensoren müssen austauschbar sein).</li> <li>- Die Schnittstelle muss standardisiert sein.</li> </ul>

Tabelle 4-2: Wirtschaftliche Anforderungen



## **Normative Anforderungen**

Die Bahnbetreiber sind verpflichtet ihren Betrieb sicher zu führen und die Eisenbahninfrastruktur, Fahrzeuge und Zubehör sicher zu bauen und in betriebssicherem Zustand zu halten (vgl. AEG § 4 (1) [AEG02]). Bahnanlagen müssen so beschaffen sein, dass sie den Anforderungen der Sicherheit und Ordnung genügen. Diese Anforderungen gelten als erfüllt, wenn die Bahnanlagen den Vorschriften dieser Verordnung und, soweit diese keine ausdrücklichen Vorschriften enthält, anerkannten Regeln der Technik entsprechen (vgl. EBO § 2 (1) [EBO06]). Anerkannte Regeln der Technik sind nach einschlägiger deutscher Rechtsauffassung alle auf Erkenntnissen und Erfahrungen beruhenden technischen Regeln, deren Befolgung notwendig ist, um Gefahren auszuschließen und die in den betreffenden Fachkreisen bekannt und mehrheitlich als richtig anerkannt sind [Wik10]. Aufgrund der Gemeinschaftsanlage müssen die Vorschriften der Bahn und des Straßenbaulastträgers eingehalten werden. Hierzu zählen insbesondere die EBO, die StVO und das EKrG sowie die Ril 815 im Netz der DB AG und die Bahnübergangsvorschrift für nichtbundeseigene Eisenbahnen (BÜV-NE) als gesetzliche Grundlage [Str08].

### **4.1.2 Analyse der Ausgangssituation**

Für die kommenden Jahre wird laut Kefer [Kef09] erwartet, dass etwa 1000 noch vorhandene BÜ mit Anrufschraken mit einem neuen Sicherungsverfahren ausgerüstet werden müssen. Bislang gibt es jedoch keine Technologie, um die Anrufschrakenfunktionen vollends in eine automatisierte Lösung zu überführen. Daher sind derzeit die einzigen Möglichkeiten, Ersatz für alte Anrufschraken zu schaffen

1. die Ausrüstung mit konventioneller BÜSA ohne Anruffunktion,
2. die Aufhebung des Bahnübergangs oder
3. eine bauliche Lösung für eine höhenfreie Kreuzung der Verkehrswege.

Die dritte Möglichkeit ist mit sehr hohem Invest verbunden, die zweite Möglichkeit führt zu einer Unterbrechung des bislang bestehenden Straßenverkehrswegs und ist daher oft nicht umsetzbar. Somit bleibt als naheliegende Lösung eine neue BÜSA ohne Anruffunktion (siehe Abbildung 4-3). Auch hier ist das Verhältnis zwischen Invest und Kritikalitäten-Mix nicht adäquat zu den Anforderungen:

- Bei Ablösung durch beispielsweise Halbschrakenanlagen muss der Weg über den Bahnübergang u. U. auf mind. 5,50 m verbreitert werden, so dass sich zwei Straßenfahrzeuge darauf begegnen können. Dies führt zu hohen Straßenbaukosten.
- Bei Einbau einer Schrankenanlage muss eine Radar-GFR installiert werden, sofern kein Personal vor Ort verfügbar ist.

Somit ist festzustellen, dass bisher bei abgängigen Anrufschraken keine betrieblich-wirtschaftlich optimalen Alternativen zur Wahl stehen, welche die o. g. Anforderungen darüber hinaus nur zu geringen Teilen erfüllen würden.

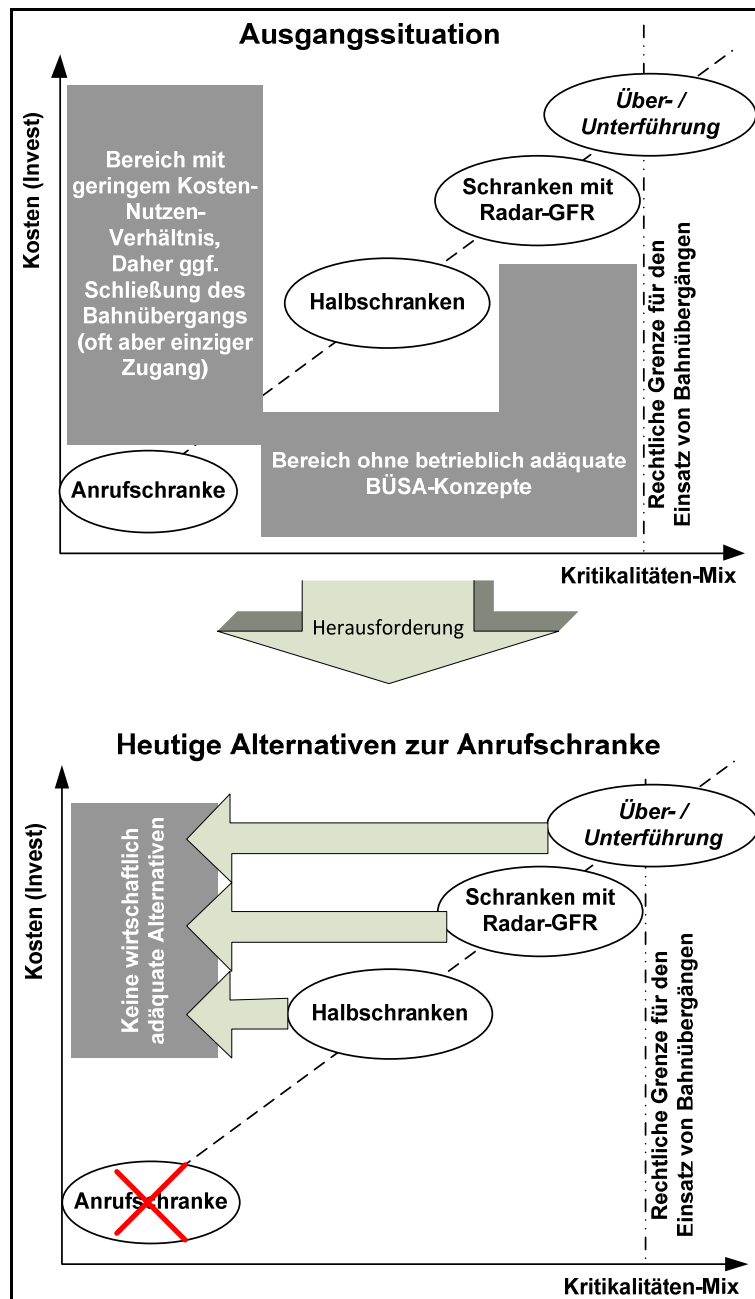


Abbildung 4-3: Herausforderung der Ausgangssituation

Wenn nachfolgend aufgeführte Thesen belegt werden können, sind dies Gründe, die dafür sprechen, bei bestimmten Randbedingungen eine BÜSA mit einer automatisierten bedarfsge- steuerten Betriebsweise nach dem Anrufschrakenprinzip einzusetzen:

- Optimale Lösung bei Bahnübergängen mit geringem Straßenverkehrsaufkommen.
- Geringere LCC der Anlage gegenüber heutiger Ersatzmaßnahmen.
- Bei geringer Fahrbahnbreite können umfangreiche Straßenbaumaßnahmen, wie bei Ersatz mit Halbschranken, vermieden werden.

Bei der geringen Anzahl noch existenter Anrufschraken ist davon auszugehen, dass es unverhältnismäßig wäre eine neue Technologie zur Automatisierung der Grundfunktionen zu entwickeln. Insbesondere da im Bahnsektor der Aufwand für Entwicklungen, aufgrund der sehr hohen Sicherheitsanforderungen, eher hoch einzustufen ist und Technologien ohnehin in

einem ungünstigeren Verhältnis zur Anzahl der Anwendungsfälle als beispielsweise beim Straßenverkehr steht. Die Entwicklung einer neuen Anrufschrake ist daher nur realistisch und aus strategischer Sicht umzusetzen,

1. wenn die betrieblichen Randbedingungen keine andere Lösung zulassen, oder
2. wenn die Entwicklung einer Technologie zur Automatisierung der Grundfunktionen noch weiteren Nutzen bei anderen BÜSA impliziert (hohes Kostensenkungspotenzial).

Ein hohes Kostensenkungspotenzial ist dann vorhanden, wenn das neue technologische System beispielsweise zur automatischen Straßenbelegungsüberwachung bzw. Rückstauerkennung für Halbschrakenanlagen an Bahnübergängen parallel zu Straßen mit hoher straßenseitiger Kritikalität (vgl. [Dam10]) genutzt werden kann oder zu einer neuen Form der GFR führt.

## 4.2 Identifikation des Optimierungspfades

Bisherige Alternativen zur Anrufschrake besitzen ein ungünstiges Kosten-Nutzen-Verhältnis für die am Einsatzort existierenden Anforderungen, weshalb dort ein Investitionsstau zu verzeichnen ist. Um die hohen Kosten einer Ersatzlösung abgängiger Anrufschraken zu reduzieren, muss das ablösende Automatisierungskonzept geringere LCC aufweisen. Die LCC werden durch betrieblich-wirtschaftlich optimierte Lösungsansätze mit einem verringerten Implementierungsaufwand gesenkt. Die Senkung der Begleitkosten (Planung, Straßenbau, Landkauf etc.) ist dabei laut Laumen [Lau08] eine Voraussetzung. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, ein wirtschaftliches Technologiekonzept zu entwerfen, was beispielsweise vom Einsatz so genannter Standardkomponenten aus der Industrieautomatisierung erwartet wird (vgl. [Kef09], [Bus07]). Zur Identifikation des Kostensenkungspotenzials sind insbesondere die Erkenntnisse zu den Kostentreibern bei den derzeit die Anrufschrake ablösenden Systemen zu berücksichtigen.

### 4.2.1 Kostensenkungspotenziale im BÜSA-Zyklus

Die Kostentreiber heutiger BÜSA können den Kostenblöcken Grundfunktionen, Bahnspezifika und sicherheitstechnische Funktionen zugeordnet werden (vgl. Tabelle 4-3).

Kostenblöcke	Kostentreiber
Grundfunktionen	Planung/Genehmigung, Projektierung, Projektengineering, Tiefbau, Verkabelung, Oberbau, Montage Schalthaus mit Netzanschluss und Stromversorgung Fundamente, Lichtzeichenmaste mit Lz, Schranken mit Bäumen (Schranken werden dabei aufgrund höherer Begleitkosten gegenüber Halbschrakenanlagen (höherer Kabelaufwand aufgrund längerer Einschaltstrecke, erforderliche Gefahrenraumüberwachung etc.) nur bei erforderlicher Rechtslage eingesetzt.) Sensoriken zur Ein/Ausschaltung Gefahrenraumüberwachung
Bahnspezifika	Technische Schalteinrichtungen mit den aus den Lastenheften definierten Funktionsbedingungen Umgebungsbedingungen, Temperatur, Windlast, mechanische Stabilität, Maßnahmen zur Langlebigkeit Ersatzteilmanagement
Sicherheitstechnische Funktionen	Zweikanaligkeit der Anlagenelemente Doppelfadentechnik, Ersatzschließen bei Schrankenantrieben, Verdoppelte Stromversorgung bei Fü - Anlagen Kurze Ausfallöffnungszeiten

Tabelle 4-3: Kostenblöcke bei BÜSA

Nach Laumen [Lau08] verteilen sich bei einer durchschnittlichen BÜSA mit Halbschranken die absoluten Kosten auf das Projektengineering (15 %), Straßenbaumaßnahmen (39 %), Kabel und Beton (11 %) und auf Strom- und Fernmeldeeinrichtung (4 %). Die für die Sicherung erforderlichen sicherungstechnischen Außenanlagen (17 %) und Schalteinrichtungen (14 %) belegen dagegen nur einen geringen Anteil. Bei Anlagen mit Schranken steigt dieser Anteil, da u. a. der Einsatz von einer GFR erforderlich wird. Die Kosten allein für die Investition einer GFR liegen bei etwa 50.000 Euro (Basis ist das Referenzsystems Radar-GFR, vgl. [Art06]). Die wesentlichen Anteile im BÜSA-Zyklus fallen somit auf den Anteil, der als Baumaßnahme betrachtet werden kann (Straßenbaumaßnahmen zusammen mit dem Projektengineering). Daraus lässt sich ableiten, dass bezogen auf die Gesamtkosten dieser Anteil die meisten Kostensenkungspotenziale mit sich bringen müsste.

Auf Basis dieser Kostenverteilung ist bei einer die Anrufschränke bisher ablösenden durchschnittlichen BÜSA mit der Überwachungsart ÜS und Halbschranken eine Gesamtsumme von ca. 350.000 Euro anzunehmen (vgl. [Lau09]). Für eine BÜSA mit Nutzung einer GFR und weiterer Zusatzkosten (z.B. aufgrund längerer Schrankenbäume, längerer Einschaltstrecken und Kabel sowie zusätzlichen Baumaßnahmen zur Installation der GFR) wird eine durchschnittliche Schrankenanlage mit etwa 500.000 Euro angenommen. Insgesamt ergibt sich bei 1000 Anrufschränken ein Investitionsbedarf in kommenden Jahren zwischen 350.000.000 Euro und 500.000.000 Euro. Da dies nicht leistbar ist, müssen Alternativen identifiziert werden.

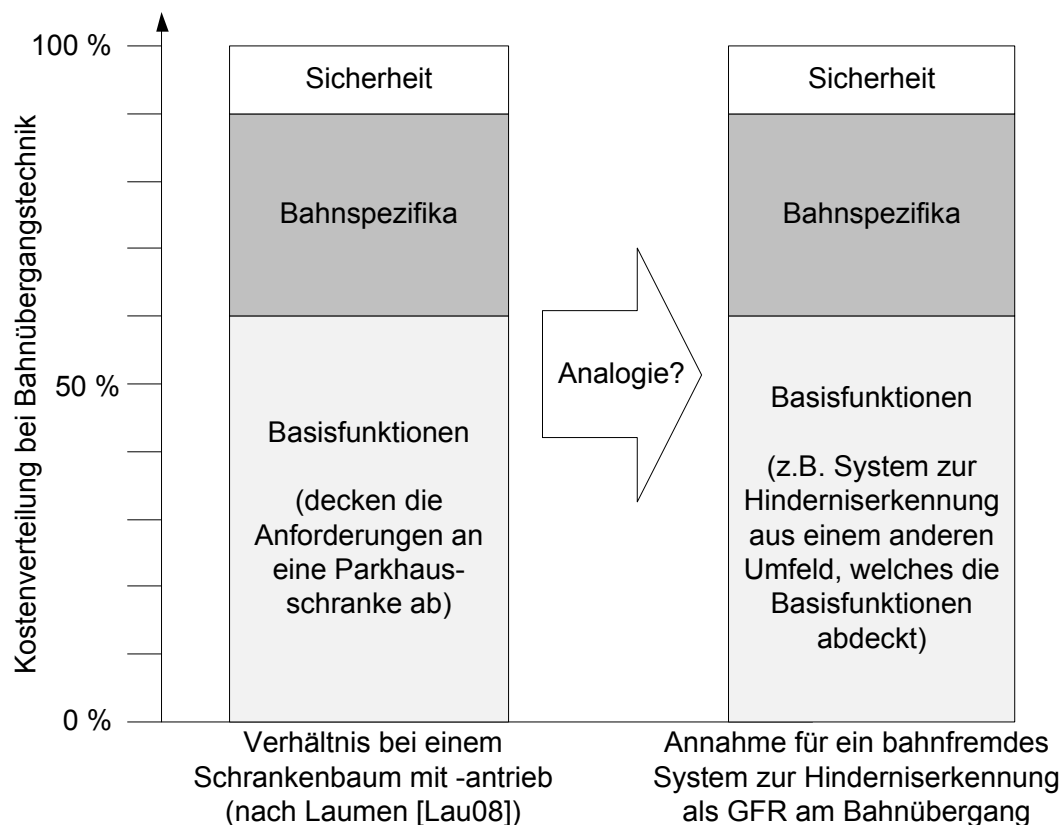
Weitere Kostensenkungspotenziale sind im Bereich der Technologie zu finden [Ape09]. Ein solches Potenzial ist u. a. bei der technischen Gefahrenraumüberwachung festgestellt worden [LM08]. Alternative Lösungen für eine GFR, beispielsweise aus der Industrieautomatisierung, die möglichst viele Funktionen erfüllen kann und wirtschaftlicher als Radar-GFR einzustufen ist, sind hierfür sinnvolle Optimierungsansätze.

Die Automatisierung der Anrufschränke mit ihrem geringen Straßenbauanteil ist bezogen auf die Anschaffungskosten eine wirtschaftliche Alternative zu bisherigen Ablösekonzepten. Bei einer Annahme, dass der Tiefbauanteil deutlich (um bis zu 60 %) reduziert wird, eine Technologie für die Umsetzung der Grundfunktionen bereitgestellt wird, die deutlich geringere Kosten als die Radar-GFR aufweist (ca. 40 % des Investitionsvolumens einer Radar-GFR) und das Sicherungsverfahren autark realisiert werden kann, ergibt sich eine prognostizierte Anlageninvestition von ca. 320.000 Euro bei höherer Funktionalität und Beibehalten des Betriebskonzeptes mit geringen Betriebskosten.

Aufgrund der relativ geringen zu erwartenden Stückzahlen bei der Ablösung von Anrufschränken wird die Motivation zur Entwicklung neuer Technologien für einzig diesen Anwendungsfall gering sein. Wäre es möglich eine neue Technologie zu entwerfen die für weitere Einsätze in Frage käme, so wäre der Anreiz für Hersteller erhöht und eine erfolgreiche Automatisierung der Anrufschränke wahrscheinlicher. In der Vergangenheit sind jedoch diesbezügliche Versuche mangels geeigneter Technologien, die den Anforderungen entsprechen würden, gescheitert. Die vorliegende Arbeit motiviert deshalb den Einsatz bisher bahnfremder Technologien, da nur so eine effiziente bedarfsgesteuerte BÜSA nach dem Prinzip der Anrufschränke gestaltet werden kann.

### Kostensenkungspotenzial durch ein neues Technologiekonzept

Für die Weiterentwicklung bisher bahnfremder Technologien zu bahntauglichen Konzepten ist eine Kostenanalogie zu anderen Komponenten der BÜ-Technik zu erwarten. Abhängig von den Anforderungen steigen dort die Kosten. Parallelen können beispielsweise aus dem Vergleich von einer Schrankenanlage für ein Parkhaus mit einer Schrankenanlage für einen Bahnübergang gezogen werden. Die Basisfunktionen sind identisch, aber die Anforderungen an die Sicherheit und die Bahnspezifika sind bei Schranken für BÜSA deutlich höher, weshalb für die gleiche Funktionalität der Gesamtinvestition bei Bahnübergangsschranken höher als bei Parkhaus-Schranken ist (vgl. [Lau08]). Dieser Zusammenhang wird in Abbildung 4-4 verdeutlicht.



**Abbildung 4-4: Angenommene Kostenanalogie bei BÜSA-Technologie**

Sind diese Verhältnisse übertragbar, dann können Ansätze aus anderen Domänen, die vergleichbare Funktionen zu erfüllen haben, wie dies bei einer GFR erforderlich ist, analog zur Schrankenanlage bewertet werden. Für weitere Betrachtungen wird davon ausgegangen, dass Ansätze zur Hinderniserkennung aus der Industrieautomatisierung oder aus dem Automobilbereich als Fundament genutzt werden können, aber durch Bahnspezifika und Sicherheitsanforderungen einen prozentual ähnlich erhöhten Invest erfordern. Der Einsatz einer neuen Technologie muss für die Umsetzung eine höhere Anzahl an Funktionen als die bisher eingesetzte GFR ermöglichen, der Invest wird gegenüber der Radar-GFR deutlich geringer ausfallen müssen, ohne die Betriebskosten zu erhöhen. Das durch ein neues Technologiekonzept für die GFR zu erwartende Kostensenkungspotenzial ergibt sich aus dem Vergleich einer Basistechnologie mit der Referenztechnologie Radar-GFR (siehe Abbildung 4-5).

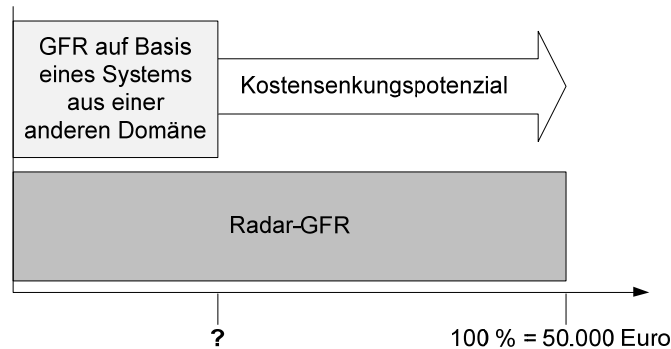


Abbildung 4-5: Kostensenkungspotenzial bei GFR

### 4.2.2 Bahnfremde Technologien für die Anrufschrakenautomatisierung

Die Identifikation neuer Technologiekonzepte ist eine Voraussetzung, um die Sicherheit und Leistungsfähigkeit des Schienennetzes nachhaltig effizient zu gestalten. Zur Senkung der LCC werden bei der Zugsicherung bereits vereinfachte Betriebsverfahren eingesetzt [Hei05]. Die Akzeptanz für den Einsatz von vereinfachter, d.h. bahnfremder Technologie ist jedoch bisher kaum gegeben. Allerdings findet auch hier ein verstärktes Umdenken statt. Die Bahnbetreiber sind gezwungen die LCC ihrer Anlagen deutlich zu senken und forcieren daher den Einsatz wirtschaftlicher Industriekomponenten (vgl. [Kne09]), denn nur durch Senkung von Markteintrittsbarrieren für Commercial-off-the-shelf (COTS) Komponenten ist langfristig eine Steigerung der Erneuerungsrate bei BÜSA umsetzbar. COTS-Komponenten aus dem Automobilbereich werden unter ähnlichen Umgebungsbedingungen, wie sie am Bahnübergang vorkommen können, eingesetzt. Dazu gehören u. a. Systeme zur Fahrwegbeobachtung oder Systeme, die das Erkennen von Hindernissen auf dem Fahrweg ermöglichen (vgl. [Lam08], [FG03]). Die Abbildung 4-6 ([Bild links: Pilz GmbH & Co. KG], [Foto rechts: Meyer zu Hörste]) deutet die Herausforderung an, der sich Wissenschaft, Industrie und Betreiber deshalb gemeinsam stellen müssen, um Technologien aus anderen Domänen (im linken Foto wird als Beispiel das Überwachungssystem SafetyEYE® gezeigt, vgl. [Pil07]) für den Einsatz zur Hinderniserkennung bei Bahnübergängen weiterzuentwickeln.

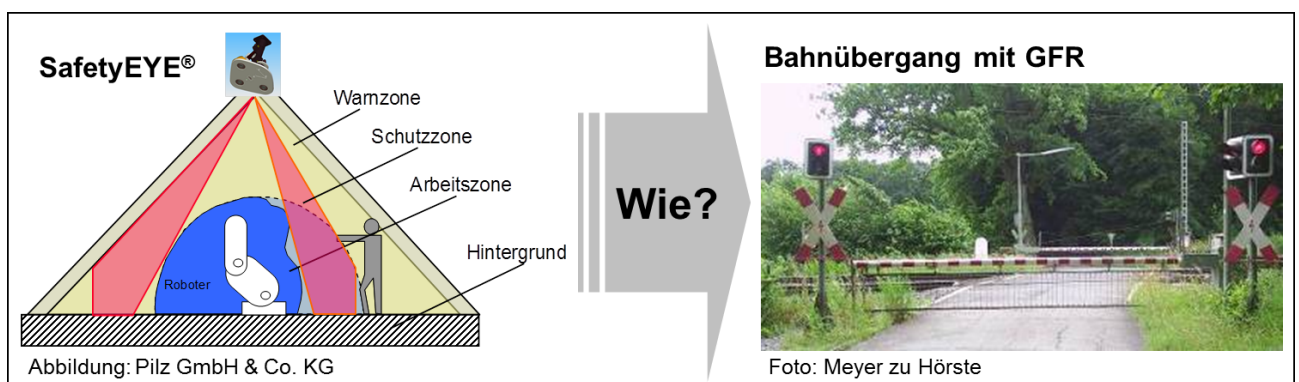


Abbildung 4-6: Fragestellung nach der Übertragbarkeit von Komponenten

Einen Beitrag hierzu konnte durch das Forschungsprojekt SELCAT erbracht werden, bei dem verschiedene Technologien hinsichtlich eines Einsatzes zur Hinderniserkennung an Bahnübergängen analysiert und bewertet wurden (vgl. Kapitel 2.3). Von [Art06] wurde in diesem Zu-

sammenhang festgestellt, dass radar- und kamerabasierte Lösungen ein hohes Potenzial be-reithalten, um entsprechend dieser Aufgabe eingesetzt zu werden (vgl. Abbildung 4-7).

Kriterien	Technologien				
	Lidar	Ultraschall	Radar	Kamera	Induktionsschleife
Umweltbedingungen	2	2	4	3	5
Invest	3	1	2	2	2
Installationszeit	2	4	4	5	2
Lebensdauer	3	3	2	3	4
Detektiert Menschen und Fahrzeuge	2	3	5	5	1
Fehleranfälligkeit	1	1	3	3	4
Summe	13	14	20	21	18

Skala: von 1 = sehr schlecht bis 5 = sehr gut erfüllt

**Abbildung 4-7: Bewertung von Technologien zur Hinderniserkennung (nach [Art06])**

### Bestimmung einer Technologie

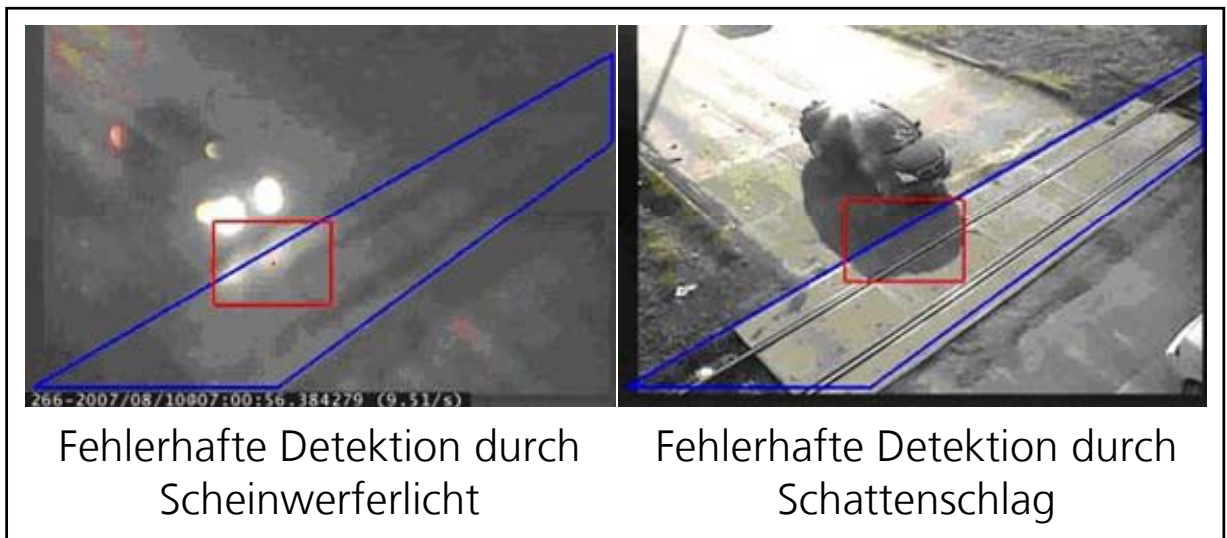
Mit den im Rahmen von SELCAT identifizierten Optimierungsansätzen, in dem verschiedene Lösungsansätze zur Hinderniserkennung beschrieben sind und wie in Kapitel 2.3 zusammenfassend festgestellt wurde, sind optische Systeme als aussichtsreichste Technologien für eine GFR weltweit anerkannt. Diese Annahme wird durch Winter [Win09] untermauert, der die entscheidenden Vorteile von Kamera-Systemen gegenüber anderen Technologien (z.B. Laser oder Radar) in einer besseren räumlichen Erfassung und einer höheren Funktionalität erkennt und einschätzt, dass diese in den kommenden Jahren kostengünstiger als die Radar-Technologie sein werden.

Auf Grundlage der zuvor benannten Arbeiten wird im Vergleich zur Referenztechnologie (Radar-GFR) untersucht, welche Ausprägung eines optischen Systems (Mono- oder Stereo-Kamera-System) für die Umsetzung der Grundfunktionen des Automatisierungsansatzes für Anrufschranken am besten geeignet ist. Für den Einsatz von optischen Systemen zur Anrufschrankenautomatisierung sprechen deren Erprobt- und Bewährtheit in einer Vielzahl von den Menschen unterstützenden Assistenzsystemen. Aus dieser Erkenntnis resultiert der wesentliche Vorteil dieser Systeme gegenüber dem Bediener einer Schrankenanlage: die Ermüdungsfreiheit und eine objektive Gefahreinschätzung.

### Eigenschaften optischer Systeme - bezogen auf den spezifischen Anwendungsfall

Optische Systeme sind in einer Vielzahl von Domänen weit verbreitet, so dass auf ein breites Marktsegment zurückgegriffen werden kann. Somit wird zur Reduktion des Risikos der Obsoleszenz beigetragen. Laut Keller [Kel02] sind die in älteren Quellen als Nachteile dieser Technologie herausgestellten Eigenschaften wie die geringe Rechenleistung der Systeme zur Bildverarbeitung heutzutage kein Problem mehr und können bei einem Vergleich mit anderen Technologien vernachlässigt werden. Für die Steigerung der Effizienz der Bildverarbeitung werden programmierbare Bausteine, wie zum Beispiel Field Programmable Gate Arrays (FPGA), eingesetzt die zudem echtzeitfähig sind [Str06]. Mit diesen FPGA können laut [Ben02] Algorithmen schneller ausgeführt werden als auf einem herkömmlichen Prozessor.

Ein Bildverarbeitungssystem zur Hinderniserkennung muss Objekte anhand von bestimmten Merkmalen (wie beispielsweise Form, Größe etc.) extrahieren (Objektextraktion) können. Verdeckungen führen zu fehlenden Merkmalen. Rauschen, Reflexionen und Schatten führen zu verfälschten Merkmalen (vgl. [Mie06], [Ste07], [Ste02], [Lan05], [Bör05]). Die Nachteile monokularer Kamera-Systeme (starke Abhängigkeit von Sichtbedingungen, Probleme bei Entfernungsbestimmung und beim Erkennen undefinierter Gegenstände) treten bei Stereo-Kamera-Systemen weniger stark auf. Schattenschlag und Lichtkegel, wie in Abbildung 4-8 am Beispiel von Mono-Kameras gezeigt wird, führen bei Stereo-Kamera-Systemen nicht zu Fehlinterpretationen. Zur Vermeidung umgebungsbedingten Systemversagens sind störende Elemente (z.B. Baumwuchs) zu beseitigen und betriebliche Rückfallebenen bereitzustellen.



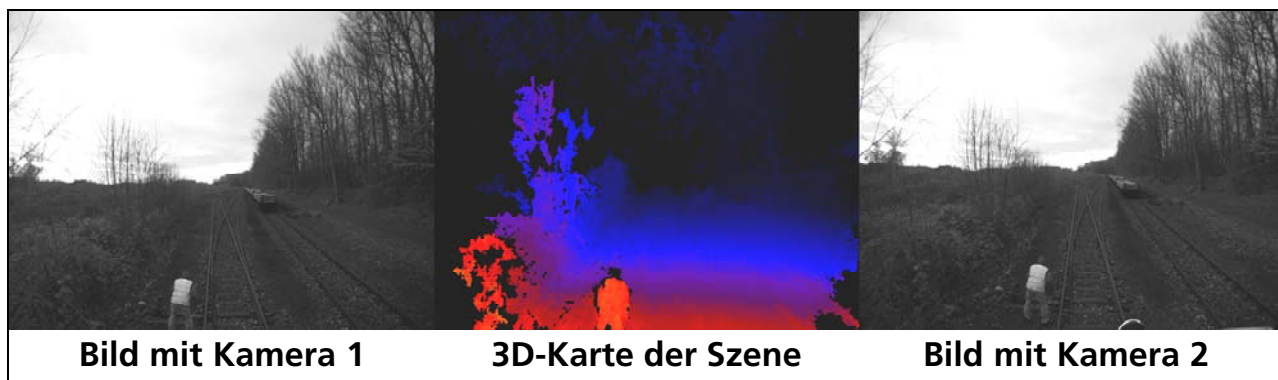
**Abbildung 4-8: Mögliche Fehlinterpretationen bei Mono-Kameras (nach [MDD07])**

Bei der Stereobildverarbeitung werden Informationen über die Lage von Objekten im dreidimensionalen Raum ermittelt, welche aus zweidimensionalen Bildern gewonnen werden [Tet05]. Das Stereo-Prinzip ist dem menschlichen Sehen angelehnt und liefert ebenso Tiefeninformationen (vgl. [Reu07], [Bör05]) aus denen mittels Bildverarbeitung Informationen gewonnen werden können. Dadurch können Objekte detektiert werden die sich beispielsweise von der Fahrbahn abheben. Stereo-Kamera-Systeme erfordern dementsprechend keine weiteren Sensoren für eine lückenlose Gefahrenraumüberwachung. Dies ist vorteilhaft gegenüber der Radar-GFR zu bewerten, womit der Gefahrenraum wie ein Fächer abgetastet wird und die Möglichkeit eines Nichtdetektierens offen lässt. Eine Fusion mehrerer Sensorsysteme würde zwar laut Catalá Prat [Cat11] die Qualität (Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit) der Information zur Erkennung von Objekten und zum Ableiten von Gefahren erhöhen, die Gesamtsystemkosten würden jedoch sehr wahrscheinlich steigen.

Durch eine echtzeitfähige Bildverarbeitung können verschiedene Informationen, die aus den Bilddaten ermittelt werden, ausgewertet werden, weshalb ein Stereo-Kamera-System parallel für verschiedene Aktionen genutzt werden kann. Dies ist ebenso vorteilhaft im Vergleich zu Technologien wie Radar oder Induktionsschleifen zu bewerten. Es kann somit mittels eines Sensors der Bereich vor und hinter den Schranken separat untersucht werden, in dem bestimmte Bildbereiche unterschiedlich ausgewertet werden, wie dies z.B. durch [HKR+94] und [HKT98] beschrieben wird.



Aus den Bilddaten zweier Mono-Kameras ist es laut Börner möglich, mittels 3D-Rechner eine 3D-Karte der Szene zu ermitteln (vgl. [Bör06], [Bör10]). Mit dieser 3D-Karte wird jedem Bild-Pixel eine Entfernungsinformation zugeordnet, woraus dann die Information „Abstand der Objekte zum Sensor“ ermittelt wird, so dass die Voraussetzungen für eine Hinderniserkennung auf Basis von Abstandsmessungen gegeben sind (siehe Abbildung 4-9: rote Bildbereiche sind näher am Sensor als blaue). Dieses aus der Robotik stammende Stereo-Kamera-System wurde während des DLR-Projektes RCAS für Anwendungen im Bahnbereich weiterentwickelt, wo es zunächst für fahrzeugseitige Applikationen bestimmt ist (vgl. Kapitel 2.3).



**Abbildung 4-9: Tiefenbild (3D-Karte) einer Stereo-Kamera [Bör10]**

Die bei RCAS verwendeten CMOS Sensoren sind abbildende Sensoren, mit denen auch Bildübertragungen (z.B. zu einem Fahrdienstleiter) möglich sind. Die CMOS Sensoren zeichnen sich durch eine geringe Fehlalarmrate und hohe Zuverlässigkeit aus (vgl. [God06], [Bör06]). Da diese Sensoren in einer Vielzahl von technischen Systemen (z.B. Fotokameras) seit Jahren zum Standard gehören, ist davon auszugehen, dass diese Technologie in den kommenden Jahren nicht obsolet wird - eine Grundvoraussetzung für den Einsatz im Bahnbereich.

Das optische System des Projektes RCAS besitzt für ein sicheres und automatisches Erkennen eines Straßenverkehrsteilnehmers (Fußgänger, Radfahrer, Straßenfahrzeuge) im Gefahrenraum des Bahnübergangs eine geeignete Basisfunktionalität, weshalb dieses Stereo-Kamera-System für die weiteren Betrachtungen als Referenzsystem dient. Der Einsatz von Stereo-Kameras zur Hinderniserkennung am Bahnübergang wird ebenfalls durch [Oht05] favorisiert und für seine Forschungen zur Hinderniserkennung am Bahnübergang erfolgreich eingesetzt.

#### Auswahl

Auf Basis der o. g. vorgelagerten Studien und Feststellungen wird an dieser Stelle ein Vergleich zwischen Radar und optischen Systemen durchgeführt, wobei zwischen Mono- und Stereo-Kamera-Systemen differenziert wird.

Mit den in Kapitel 4.1.1 ermittelten Anforderungen zur Erfüllung der Grundfunktionen werden Kriterien (siehe Tabelle 4-4) gebildet, die den Vergleich der Technologien gemäß den wirtschaftlichen, betrieblichen und funktionalen Zielen ermöglichen.

	Kriterien	Technologie		
		Mono-Kamera-System	Stereo-Kamera-System	Radar-GFR
<b>A</b>	<b>Betriebliche Kriterien</b>			
1	Verarbeitung der Daten ist mit der menschlichen Wahrnehmung vergleichbar und kann ggf. durch Menschen mittels Live-Zuschaltung direkt genutzt werden	+	+	-
2	Unabhängig von Regen, Schnee, Nebel	-	o	o
3	Weitestgehender Ausschluss von Beeinträchtigungen durch Umwelteinflüsse wie Insekten, Sonneneinstrahlung etc.	-	o	+
4	Detektiert das Volumen von 3D-Objekten	-	+	o
5	Marktsicherheit (große Auswahl an Sensoren und Verarbeitungssystemen, da viele Anbieter am Markt)	+	+	-
6	Intelligente Auswertung des Bedarfswunsches (z.B. Vermeidung des Schrankenöffnens, wenn Tiere vor Schranke stehen)	+	+	-
7	Kann den Bereich vor den Schranken und zwischen den Schranken nach unterschiedlichen Anforderungen auswerten	o	+	-
8	Detektiert Menschen und Fahrzeuge	+	+	+
9	Ermöglicht eine Unterscheidung zwischen Mensch und Fahrzeug	+	+	-
10	„Betonklotz“ wird erkannt (kleine Objekte unter 0,5 m Höhe)	+	+	-
11	Den Bereich bis zu den Schrankenbäumen scannen, unterhalb und davor	+	+	o
12	Wechselnde Lichtbedingungen (z.B. Scheinwerferlicht der Straßenfahrzeuge) und Schattenschlag stellen kein Problem dar	-	+	+
<b>B</b>	<b>Wirtschaftliche Kriterien</b>			
1	Potenzial für geringere Kosten der einzusetzenden Sensoren gegenüber der Radar-GFR (weniger 50.000 Euro, vgl. [Art06]) [Win06]	o	o	
2	Feldwegtauglich (kann bei jedem Untergrund eingesetzt werden)	+	+	+
3	Kann verschiedene Bereiche des BÜ mit einem Sensor-System unabhängig voneinander detektieren (hohe Funktionalität)	+	+	-
4	Obsoleszenz der Sensoren ist nicht zu erwarten	o	o	o
<b>C</b>	<b>Funktionale Kriterien</b>			
1	Bedarfserkennung vor den Schranken (Unterscheidung zwischen Menschen und Fahrzeugen)	+	+	-
2	Rückstauerkennung (Fahrzeuge im Bereich der Schranke und im GF erkennen)	+	+	o
3	Gefahrenraumüberwachung ist möglich	-	+	+
4	Weitere Applikationen möglich (z.B. Live-Bild-Übertragung)	+	+	-
5	Volumen von Objekten berechnen können (zur differenzierten Detektion erforderlich)	-	+	-
6	Abstände von Hindernissen zum Sensor für jedes Pixel (Bildpunkt) messbar	-	+	-
<b>+ = erfüllt das Kriterium, - = erfüllt das Kriterium nicht, o = erfüllt das Kriterium nur teilweise</b>				

Tabelle 4-4: Entscheidungsmatrix für die Wahl der geeigneten Technologie

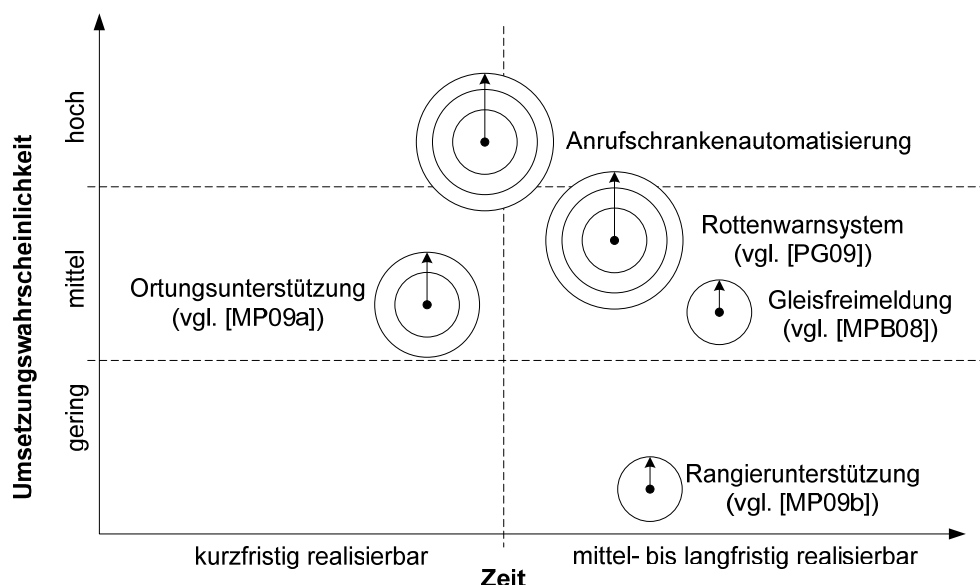
### Auswertung

Die Bewertung der Erfüllung der Kriterien erfolgte für den Anwendungsfall Anrufschrakenautomatisierung. Für die Automatisierung der Grundfunktionen ist die Stereo-Kamera eine geeignete Technologie. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird deshalb das Sensorsystem genutzt, das auf dem Stereo-Kamera-System aus dem DLR-Projekt RCAS basiert. Besonders vorteilhaft gegenüber Radar ist die höhere Funktionalität, die mit diesem System erreichbar ist. Dies bedeutet, dass die Grundfunktionen Bedarfserkennung, Rückstauerkennung und Gefahrenraumüberwachung mit einem einzelnen System umgesetzt werden können.

Aufgrund mangelnden Reifegrades muss dieses Stereo-Kamera-System zunächst als eine Option betrachtet werden. Die spezifische Objektextraktion und Auswertung dieser Informationen müssen bahnspezifisch erweitert werden. Werden zukünftig Alternativen zu diesem Ansatz identifiziert (z.B. Low-cost Radar aus dem Automobilbereich), sind diese gegebenenfalls als Systembestandteil für ein zukünftiges Systemdesign zu berücksichtigen.

Wenn Zeit oder die Vermeidung umfangreicher Entwicklungskosten wichtiger als Funktionalität eingestuft werden, dann sind eher andere Lösungen als ein Stereo-Kamera-System für die Anrufschrakenautomatisierung zu nutzen. Bei kurzfristigen Lösungen ist gegebenenfalls die Radar-GFR mit zusätzlichen Komponenten (z.B. Taster zur Bedarfserkennung) zu kombinieren. Da die Radar-GFR aber langfristig auch keine Option darstellt (vgl. Kapitel 4.1), ist es umso mehr erforderlich, neuen Technologien den Zugang zum Bahnsystem zu ermöglichen.

In einer Studie zur Ermittlung potenzieller betrieblicher Anwendungsfälle für optische Systeme im Bahnbereich wurden für eine Auswahl an Lösungskonzepten deren Umsetzungswahrscheinlichkeit und das Wirksamkeitspotenzials bewertet (vgl. [Pel06]). Die Portfoliodarstellung des Ergebnisses (siehe Abbildung 4-10) zeigt, dass die Automatisierung der Anrufschrake eine hohe Umsetzungswahrscheinlichkeit bei gleichzeitig hohem Wirksamkeitspotenzials aufweist. Im Rahmen dieser Arbeit ist es ein Ziel, aufzuzeigen, wie ein Stereo-Kamera-System verfahrenssicher eingebunden werden muss, damit die Automatisierung der Anrufschrake möglich ist. Gelingt diese Entwicklung, stehen weitere Applikationen der Technologie in Aussicht.



**Abbildung 4-10: Potentielle Anwendungsfelder optischer Systeme im Bahnbereich**

## 4.3 Schlussfolgerung

Die Grundfunktion Bedarfserkennung kann mittels eines Tasters umgesetzt werden, womit jedoch die Überwachung des Gefahrenraums nicht automatisiert ist. Die Gefahrenraumüberwachung muss aufgrund des Einsatzes von Schranken und der Forderung nach autarker Betriebsweise technisch ausgeführt werden, wofür derzeit nur die Radar-GFR genutzt werden kann. Dieses System ist zur Hinderniserkennung für den Bereich zwischen den Schranken einsetzbar, da es nicht differenziert unterschiedliche Sektoren auswertet. Die Grundfunktionen können somit nicht nur mit einem einzelnen Radar-System umgesetzt werden.

Für das Optimierungsziel der betrieblich-wirtschaftlich optimalen Anrufschrakenautomatisierung ist es erforderlich die Bedarfserkennung, Gefahrenraumüberwachung und Rückstauerkennung mit einem einzelnen System zu automatisieren. Insgesamt muss bezüglich des betrieblichen Einsatzbereiches von Anrufschraken folgender Optimierungspfad verfolgt werden (siehe Abbildung 4-11): Durch eine Neuentwicklung einer Technologie wird der Ersatz eines abgängigen Betriebsverfahrens angestrebt; die neue Technologie wird darüber hinaus neue Funktionen für den Bahnübergangsbereich ermöglichen; für die Umsetzung des Betriebsverfahrens können auch bereits verfügbare BÜSA-Bestandteile verwendet werden, die es entsprechend zu kombinieren gilt.

Verbesserung des Bestands	Neues BÜSA-Konzept	Neue Technologie	Ersatz abgängiger Technologie bei Erhalt des Betriebsverfahrens	Neue BÜ-Prozesse	Neue Funktionen
Durch Neuentwicklung		X	X		X
Mit verfügbaren BÜSA-Bestandteilen			X		

Abbildung 4-11: Optimierungspfad für die Anrufschrakenautomatisierung

### Umsetzung mit einem optischen System

Im Vergleich zur derzeit verfügbaren Lösung lässt die Automatisierung der Anrufschrakenfunktionen ein Kostensenkungspotenzial erwarten. Stereo-Kamera-Systeme konnten durch die Breite an erfüllbaren Funktionen überzeugen. Dies ermöglicht den Wegfall des Bedienpersonals und ist funktionaler als die Radar-GFR. Optische Systeme werden bislang nicht für sicherheitsrelevante Aufgaben im Bahnsystem eingesetzt. Die Entwicklung dieser Komponenten im Automobilbereich stellen attraktive Anwendungsbereiche im Bahnsektor in Aussicht. Gleichzeitig gibt es wenige Möglichkeiten, Innovationen in den Bahnbereich zu integrieren, da der Aufwand für den Nachweis ausreichender Sicherheit und Zuverlässigkeit sehr hoch ist. Anhand der Anrufschrakenautomatisierung besteht die Möglichkeit, COTS-Komponenten verfahrenssicher in den Bahnbereich zu überführen, da bei Nichtfunktionsfähigkeit einer Stereo-Kamera-GFR die bedarfsgesteuerten Schranken geschlossen bleiben.

Die nächsten Schritte für eine erfolgreiche Einbindung optischer Systeme umfassen folgende Teilziele: Entwurf eines Konzepts zur Automatisierung der Anrufschrake; Beschreibung der Umsetzung der Grundfunktionen; Ableitung weiterer Funktionen für die Bahnübergangssicherung, die mit einer neu zu entwickelnden Technologie umgesetzt werden können.

### **Stufenweiser Aufbau**

Die Anrufschrake bietet den Vorteil, dass die Funktion zur Bedarfserkennung nicht sicherheitsrelevant ist und im Hinblick auf Zuverlässigkeit durch einen Taster als Rückfallebene abgesichert werden kann. Somit ist es für die Phase der Systemerprobung möglich, ein optisches System diese Funktion übernehmen und hierbei den Nachweis ausreichender RAMS-Werte (Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Wartbarkeit und Sicherheit (hier: Safety)) während einer Demonstrationsphase erbringen zu lassen. In einem weiteren Schritt wird die Rückstauererkennung umgesetzt, um dann eine ausreichende Akzeptanz für eine GFR mit einem optischen System zu erreichen. Der stufenweise Aufbau der erforderlichen Grundfunktionen ermöglicht eine schrittweise Erprobung der neuen Technologie und neuer bahnbetrieblicher Funktionen im Bahnumfeld [PEL08].

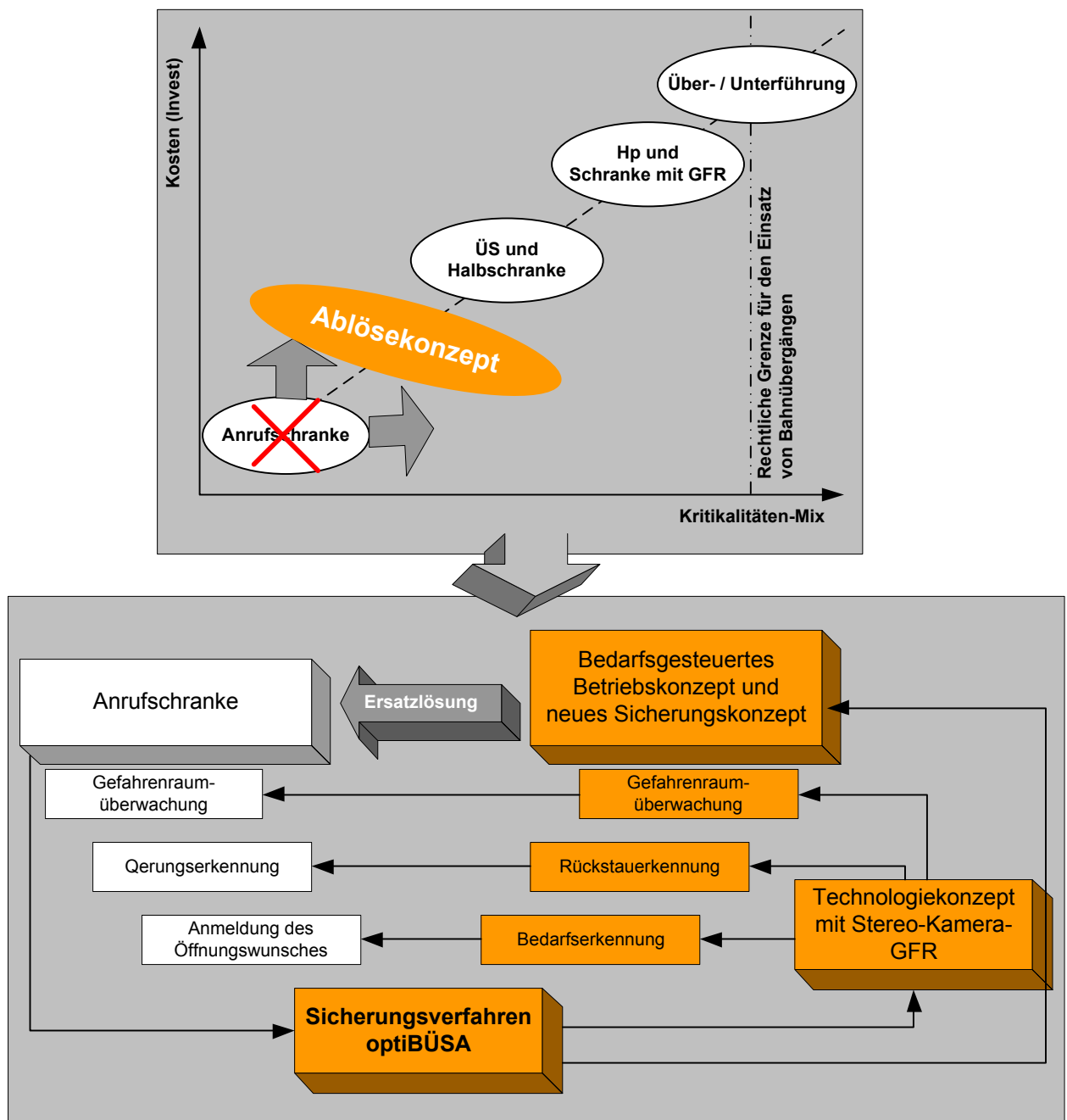
### **Ableitung weiterer Funktionen**

Der Nachweis gleicher Sicherheit durch das optische System ist derzeit nicht möglich und kann erst mit einem Demonstrator und damit durchzuführenden Langzeitmessungen belegt werden. Die Arbeit beschreibt die Anforderungen und den grundlegenden Aufbau als Vorbereitung für die entsprechenden Entwicklungsschritte. Jedoch ist es derzeit nicht auszuschließen, dass dieser Nachweis nicht erbracht werden kann, wodurch das optische System zunächst als Schwachstelle des Konzeptes betrachtet werden muss. Der Einsatz optischer Systeme wird dann Erfolg versprechend sein, wenn diese Systeme kostengünstiger im Vergleich zur Radar-GFR sind und darüber hinaus die Möglichkeit bieten, den Weg für weitere Anwendungen optischer Systeme im Bahnbereich vorzubereiten. Nur wenn die Anwendung GFR mit einem optischen System zu einem betrieblich und wirtschaftlich optimalen Einsatz führt, sind auch zahlreiche weitere Funktionen im heutigen Bahnsystem umsetzbar. Es sind dann aber auch Innovationssprünge durch weitere Funktionen machbar, die das Bahnsystem noch effizienter gestalten.

### **Festlegung der Optimierungsstrategie**

An Anlagen zur Bahnübergangssicherung werden hohe Anforderungen gestellt, die in der Entwicklung und Umsetzung hohe Kosten verursachen. Der Ansatz zur Automatisierung der Anrufschrake soll neben den betrieblichen Vorteilen, langfristig auch eine kostengünstigere Lösung gegenüber heutigen Alternativen darstellen. Zu diesem Zweck wird ein Weg beschrieben, wie Technologien aus dem Bereich der Industrie in den Bahnbereich überführt werden können. Somit wird der Forderung entsprochen, eine Steigerung der Systemintelligenz und Senkung der Investitions- und Betriebskosten zu ermöglichen (vgl. [BMW07]).

Die Strategie für die adäquate Ablösung abgängiger Anrufschraken sieht einen Realisierungsansatz für die Entwicklung einer bedarfsgesteuerten BÜSA durch eine optimierte Bahnübergangssicherung nach dem Anrufschrakenprinzip (optiBÜSA) vor. Das Sicherungskonzept wird aus dem bedarfsgesteuerten Betriebskonzept und einem Technologiekonzept bestehen. Das Technologiekonzept basiert auf der o. g. Stereo-Kamera-GFR, mit dem die erforderlichen Grundfunktionen der Anrufschrake zusammen automatisierbar sind (vgl. Abbildung 4-12).



**Abbildung 4-12: Optimierungsstrategie zur adäquaten Ablösung der Anrufschränke**

Im Ergebnis ermöglicht optiBÜSA die Entwicklung neuer Funktionen für den Bahnbereich: Bedarfserkennung und Rückstauererkennung. Diese Funktionen werden, einzeln genommen, zur adäquaten technischen Sicherung weiterer Bahnübergänge beitragen, wodurch höhere Absatzzahlen für die neu zu entwickelnde Technologie impliziert sind. Diese Optimierungsstrategie bietet daher den Vorteil weiteren Kostensenkungspotenzials (vgl. [MP08a], [MP08b]) und damit eines hohen Gesamtnutzens (siehe Abbildung 4-13).

Mit der Grundfunktion Rückstauererkennung ist ebenso das Konzept des Rückstaudetektors bei Halbschrankenanlagen zur situationsabhängigen Ansteuerung von vorgeschalteten Lichtzeichen umsetzbar, dessen Bedarf Dambietz [Dam10] aufgezeigt hat. Mit diesem Ansatz können bei Halbschrankenanlagen weniger aufwändige Straßenbaumaßnahmen erforderlich sein, was unmittelbar zur Kostenreduktion führt. Durch die gegenüber der Radar-GFR zu erwar-

tende Kostenreduktion bei der GFR sind darüber hinaus die Investitionen für Schrankenanlagen reduzierbar.

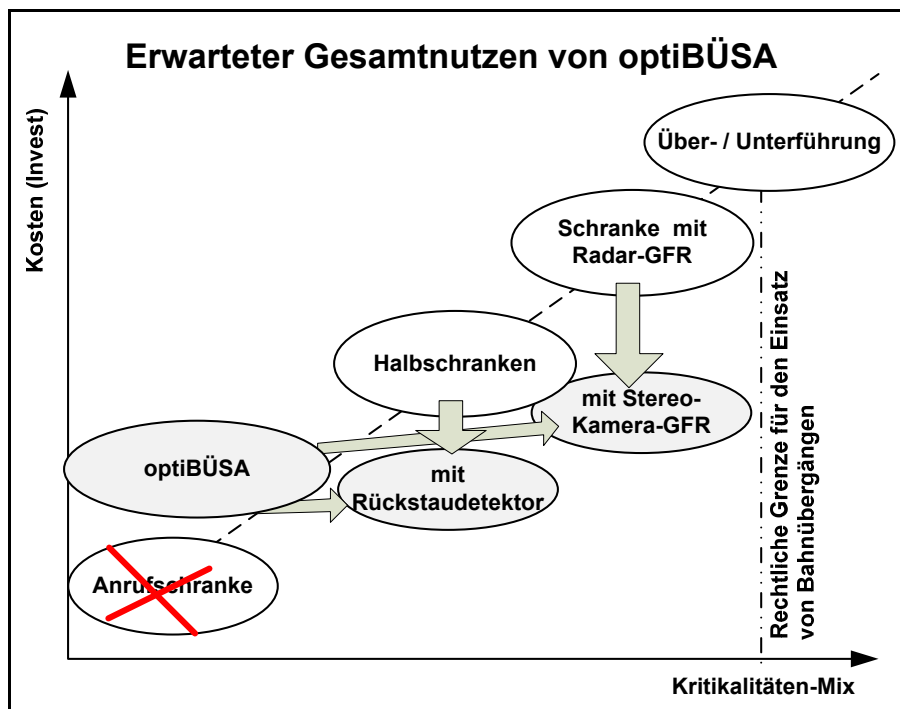


Abbildung 4-13: Potenzieller Gesamtnutzen der optiBÜSA-Technologie

## 5 Optimierte BÜ-Sicherung nach dem Anrufschrankenprinzip

In den vorangegangenen Kapiteln wurden die Eigenschaften und die betriebliche Notwendigkeit von Bahnübergangssicherungsanlagen mit bedarfsgesteuerter Betriebsweise herausgearbeitet. Ausgehend von der in Kapitel 4 festgelegten Optimierungsstrategie wird in diesem Kapitel optiBÜSA die optimierte Bahnübergangssicherung nach dem Anrufschrakenprinzip eingeführt. Nachfolgend werden hierfür das Betriebs-, Technologie- und Sicherheitskonzept beschrieben. Darüber hinaus wird der weitere Nutzen des technologischen Ansatzes vorgestellt bevor das Ergebnis dieser Konzeption im sechsten Kapitel mittels AOB bewertet wird.

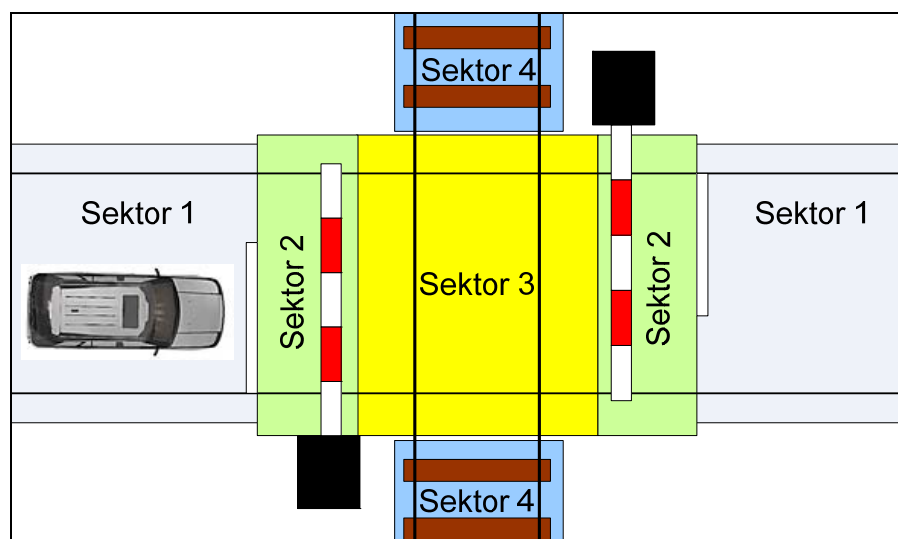
## 5.1 Betriebskonzept

Das Betriebskonzept von optiBÜSA wird von einem Stellwerk unabhängig gestaltet, so dass der Forderung nach autarker Betriebsweise entsprochen wird. Ebenso wird das Ziel verfolgt, analog zu Bahnübergängen mit Anrufschraken eine geringe Straßenbreite beizubehalten und die Sicherung des Bahnübergangs nur im Bedarfsfall vorübergehend aufzuheben. Somit wird das betrieblich Vorteilhafte einer bedarfsgesteuerten BÜSA mit dem wirtschaftlich orientierten Ansatz einer automatisierten Ausführung der BÜSA-Grundfunktionen verbunden.

## Grundfunktionen von optiBÜSA

Die Grundfunktionen von optiBÜSA entsprechen den ermittelten Systemanforderungen (vgl. Kapitel 4.1.1) und den Zielen des Betriebskonzepts. Entsprechend ihres Wirkbereiches werden diese vier Sektoren (vgl. Abbildung 5-1) am Bahnübergang zugeteilt:

- Bedarfserkennung: Sektor 1
- Rückstauerkennung: Sektor 2
- Technische Gefahrenraumüberwachung: Sektor 3
- Autark wirkende Überwachungsart: Sektor 4



**Abbildung 5-1: Sektoren für die Zuordnung der Grundfunktionen**



Die Grundfunktion „Autark wirkende Bahnübergangssicherung“ wird keinem Sektor zugeordnet, da dieser die Prozesse des Sicherens am Bahnübergang zuzuordnen sind. Den Grundfunktionen werden insgesamt weitere Funktionen hinzugefügt die teilweise nicht den o. g. Sektoren sondern der BÜ-Steuerung zugeteilt werden. Die Gesamtheit der bei optiBÜSA erforderlichen Funktionen für eine vollständige Sicherung ist in der Tabelle 5-1 aufgeführt.

Grundfunktion	Funktionen von optiBÜSA	Wirkbereich
Bedarfserkennung	Straßenseitigen Bedarf zum Queren erkennen	Sektor 1
	Bedarfsmeldung	Sektor 1
	Bedarf entgegennehmen	BÜ-Steuerung
	Den Straßenverkehrsteilnehmer (StVTn) informieren, dass er erkannt wurde	Sektor 1
Rückstauerkennung	Erkennen, dass StVTn BÜ geräumt hat	Sektor 2
	Überwachen des Schrankenschließvorgangs, so dass querende StVTn nicht von den Schrankenbäumen getroffen werden	Sektor 2
Technische Gefahrenraumüberwachung	Zustand des Gefahrenraums überprüfen	Sektor 3
Autark wirkende Überwachungsart	Feststellen der Zugposition	Sektor 4
	Mitteilen, wenn Zug den BÜ passiert hat	Sektor 4
	Zug mitteilen, dass BÜ gesichert (Überwachung des BÜ-Zustandes)	Sektor 4
	Zug mitteilen, falls BÜ nicht gesichert (Überwachung des BÜ-Zustandes)	Sektor 4
Autark wirkende Bahnübergangssicherung	Sicherung durch Öffnen der Schranken aufheben	BÜ-Steuerung
	StVTn signalisieren, dass BÜ geschlossen wird	Sektor 1
	Schließen der Schranken einleiten	BÜ-Steuerung
	BÜ sichern	BÜ-Steuerung

Tabelle 5-1: Wirkbereiche der optiBÜSA-Funktionen

### Festlegung der Überwachungsart

Zur Erfüllung der Forderung nach einer autarken Betriebsweise, muss eine dazu beitragende Überwachungsart eingesetzt werden. Die heute zur Verfügung stehenden werden hinsichtlich zu erfüllender Kriterien bewertet. Aus Abbildung 5-2 geht hervor, dass die Überwachungsart ÜS die erforderlichen Kriterien erfüllt und deshalb für die weiteren Betrachtungen als Überwachungsart für optiBÜSA genutzt wird.

Kriterien	Überwachungsarten			
	ÜS	Hp	Fü	ÜS <sub>OE</sub>
Autarke Betriebsweise	+	-	-	+
Autarke Ein- und Ausschaltung der BÜSA	+	-	+	+
Einsatz von Schranken mit GFR	+	+	-	-
Offenbarung des BÜ-Zustands gegenüber Triebfahrzeugführer	+	o	-	-
Ergebnis	geeignet	nicht geeignet	nicht geeignet	nicht geeignet

+ = erfüllt das Kriterium, - = erfüllt das Kriterium nicht, o = erfüllt das Kriterium indirekt

### Abbildung 5-2: Morphologischer Kasten zur Auswahl der Überwachungsart

Eine BÜSA mit der Überwachungsart ÜS ist eine Sicherungsanlage der freien Strecke und für Geschwindigkeiten bis 160 km/h einsetzbar. Diese Überwachungsart ist lokführerüberwacht.

Eine Verbindung zu einem Stellwerk oder einer sonstigen Überwachungsstelle ist nicht erforderlich. Für den Regelbetrieb wird kein Personal benötigt. Bei ÜS wird dem Triebfahrzeugführer (Tf) die Schaltstellung der BÜ-Sicherung durch ein Signal (dem Überwachungssignal) angezeigt. Das Überwachungssignal befindet sich im Bremswegabstand vor dem Bahnübergang. In Verbindung mit einem 1000-Hz-Magneten, der sich in Höhe des Überwachungssignals am Gleis befindet, wird der Zug bei nicht gesichertem Bahnübergang derart beeinflusst, dass dieser bei zu hoher Geschwindigkeit gebremst wird. Die Lage der Einschalt Elemente divergiert je nach Streckengegebenheiten entsprechend der Richtlinien und wird, wie auch der Bremswegabstand, anhand des schnellsten Zuges der Strecke berechnet. Das Einschalt Element befindet sich am Beginn der Einschaltstrecke vor dem Bahnübergang. Die Ausschaltung erfolgt mit Befahren des Ausschalt Elementes in unmittelbarer Nähe des Bahnübergangs. Die Signalfelder BÜ0/BÜ1 zeigen dem Tf den Zustand der BÜSA an (gem. Ril 301 [DB08b]). BÜ0 bedeutet, dass der Bahnübergang nicht befahren werden kann und der Tf vor diesem halten und ihn ersatzweise sichern muss. BÜ1 zeigt an, dass der Bahnübergang befahren werden darf.

### Anwendungsbezogene Abweichung von der Überwachungsart ÜS

Der Einsatz von ÜS beim bedarfsgesteuerten Betrieb kann jedoch zu einer für den Bahnbereich einzigartigen Situation, der Bevorrechtigung des Straßenverkehrs vor dem Schienenverkehr, führen: Für den Fall, dass ein Straßenverkehrsteilnehmer den Bedarf zum Queren unmittelbar vor einer Zugannäherung übermittelt hat, kann es zum Anhalten des Schienenverkehrs kommen. Ist die Schranke geöffnet, wird das Überwachungssignal BÜ0 anzeigen und der Zug wird vor dem Bahnübergang angehalten. Somit kommt es zu keiner gefährlichen Situation. Diese Konstellation stellt jedoch den ersten bahnbetrieblichen Fall dar, bei dem der Schienenverkehr dem Straßenverkehr Vorfahrt gewähren muss. Gemäß EBO ist dem Schienenverkehr stets Vorrang zu gewähren, weshalb einer Betriebsbehinderung durch das Öffnen der Schranken bei Zugannäherung und dem resultierenden Zughalt nicht nachgegeben werden darf.

Zur Vermeidung dieser Konstellation wird ein zeitabhängiges Ausschlusskriterium (Nicht-Öffnen-Kriterium) eingeführt. Entsprechend der zulässigen Streckengeschwindigkeit und der durchschnittlichen Querungsdauer der Straßenseite, wird ein Wirkpunkt auf der Strecke ermittelt, den ein Zug noch nicht erreicht haben darf, um die Schranken öffnen zu können. Dieser resultiert aus der Querungszeit eines Durchlaufs der Querungssequenz für den Straßenverkehr und der Einschaltstrecke für ÜS. Die Berechnung der Lage des Wirkpunkts für das Nicht-Öffnen-Kriterium wird entsprechend der Berechnungsgrundlagen aus der Ril 815 durchgeführt (siehe Abbildung 5-3).

Die Berechnung der Querungszeit ( $t_{\text{Quer}}$ ) basiert auf der straßenseitigen Räumgeschwindigkeit ( $v_{\text{St, Kfz}} = 5 \text{ km/h}$  für das langsamste und gleichzeitig längste Straßenfahrzeug), da eine Annäherung des Straßenverkehrs aufgrund der in Grundstellung geschlossenen Schranke zu vernachlässigen ist. Die Länge der Räumstrecke (Sperrstrecke und Länge des längsten Straßenfahrzeugs) wird für dieses Beispiel mit  $s_r = 27 \text{ m}$  angenommen (siehe Abbildung 5-3). Für die Berechnung des Wirkpunkts und der daraus resultierenden Strecke ( $s_{\text{WP}}$ ) zum Bahnübergang sind die straßenseitigen Kriterien und die schienenseitige Geschwindigkeit ( $v_{\text{Tfz}}$ ) maßgeblich, wobei stets  $s_{\text{WP}} > v_{\text{Tfz}} \cdot t_{\text{Quer}}$  durch Aufrundungen umzusetzen gilt.

Die Lage des Wirkpunkts wird der Einschaltstrecke ( $s_e$ ) von ÜS hinzugefügt, so dass ein Öffnen der Schranken kurz vor Erreichen des Wirkpunkts keine betrieblichen Nachteile hervorruft. Für

die Berechnung von  $s_e$  wird ein Bremsweg von  $s_{br} = 700$  m angenommen, da bereits durch das Nicht-Öffnen-Kriterium ein Queren kurz vor Befahren des Einschaltkontaktes ausgeschlossen wird. Die Zeit der Sperrung für den Straßenverkehr ( $t_{WP}$ ) ergibt sich somit aus der Strecke des Wirkpunkts zum Bahnübergang und der entsprechenden Streckengeschwindigkeit. Die Strecke zwischen Straßenmitte und Ausschaltkontakt kann aufgrund der geringen Wegstrecke für diese Berechnungen vernachlässigt werden.

Die erforderlichen Berechnungsgrundlagen sind der Abbildung 5-3 zu entnehmen.

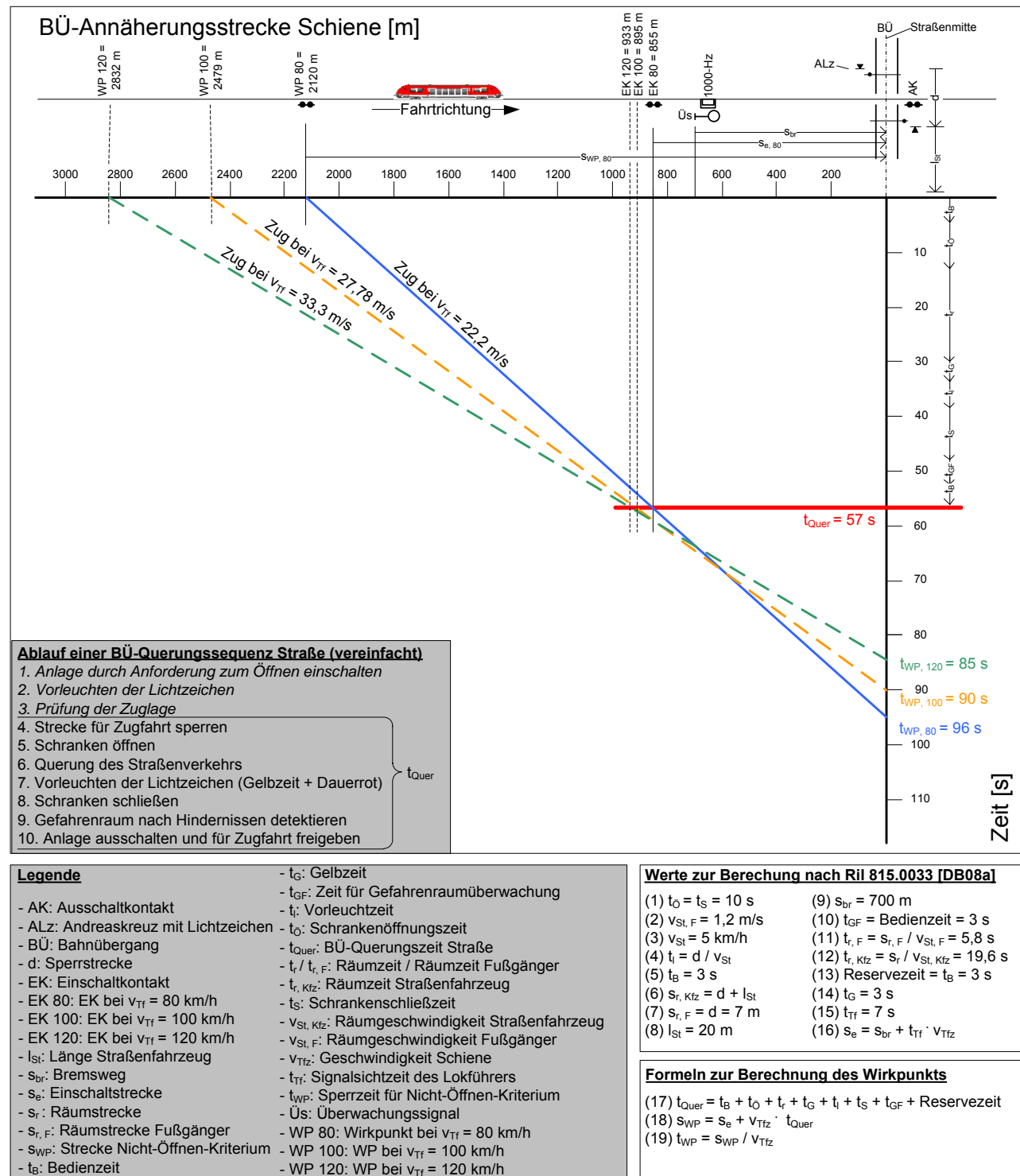


Abbildung 5-3: Berechnung der Wirkpunkte für das Nicht-Öffnen-Kriterium

Für das o. g. Anwendungsbeispiel ist  $t_{\text{Quer}} = 57 \text{ s}$ , die optimale Lage ( $s_{\text{WP}}$ ) des Wirkpunktes sowie das Nicht-Öffnen-Kriterium (Sperrzeit für den Straßenverkehr ( $t_{\text{WP}}$ )) berechnet worden und befinden sich entsprechend der angenommenen Streckengeschwindigkeit  $v_{\text{Tfz}} = 80 \text{ km/h}$  bei:

- $t_{WP, 80} = s_{WP, 80} / v_{Tfz} = 2120 \text{ m} / 22,2 \text{ m/s} = 96 \text{ s}$  (gerundeter Wert).

Darüber hinaus wurden weitere schienenseitige Geschwindigkeiten angenommen, so dass sich dementsprechend die Einschaltkontakte, Wirkpunkte und Sperrzeiten verschieben:

- $v_{Tfz} = 100 \text{ km/h}$ :  $t_{WP, 100} = s_{WP, 100} / v_{Tfz} = 2479 \text{ m} / 27,78 \text{ m/s} = 90 \text{ s}$  (gerundeter Wert)
- $v_{Tfz} = 120 \text{ km/h}$ :  $t_{WP, 120} = s_{WP, 120} / v_{Tfz} = 2832 \text{ m} / 33,3 \text{ m/s} = 85 \text{ s}$  (gerundeter Wert)

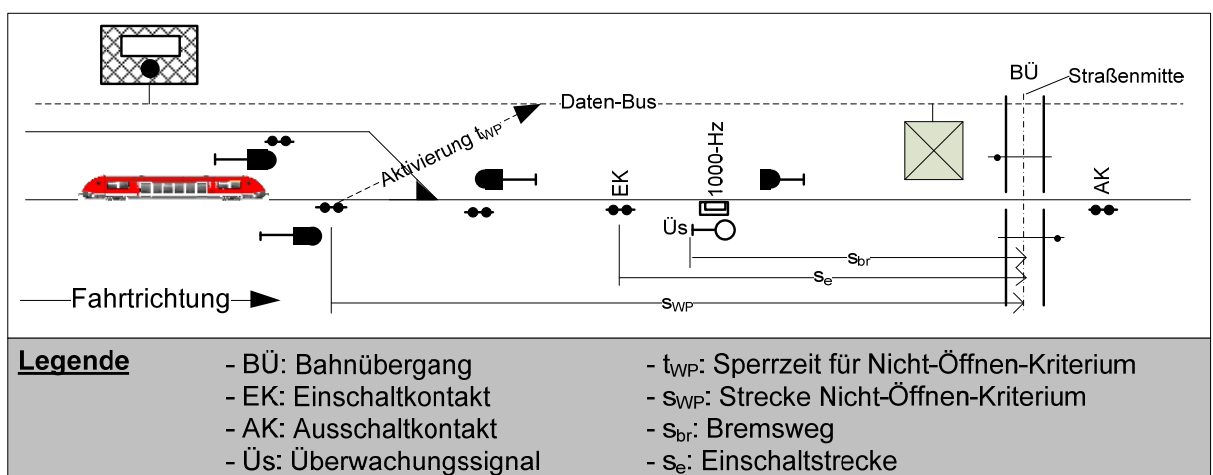
Die resultierenden Sperrzeiten bei entsprechend verschiedenen Annahmen zu Wegstrecken und Geschwindigkeiten sind aufgrund des geringen Straßenverkehrs vertretbar. Die Entfernung der Wirkpunkte zum Bahnübergang hingegen würde aufgrund zu verlegender Kabel einen hohen Aufwand verursachen.

Zur Vermeidung der möglichen Bevorrechtigung des Straßenverkehrs wird das Verfahren der Überwachungsart ÜS entsprechend des Nicht-Öffnen-Kriteriums angepasst, wobei zwei Varianten mit Berücksichtigung geringer Zusatzaufwendungen identifiziert wurden:

- Betrieb bei streckenseitiger Ausrüstung mit Streckenverkabelung
- Betrieb mit Funkanrückmelder

### Betrieb mit ÜS und streckenseitiger Ausrüstung mit Streckenverkabelung

In [Pel04a] und [Pel04b] ist ein Ansatz für ein automatisches Fahrgastinformationssystem für Regionalstrecken beschrieben, bei dem mit der Erfassung der Zugposition die Ankunftszeit des Zuges bestimmt wird. Dies wurde erreicht, indem das Zugsicherungssystem die Daten der Zugposition über einen Daten-Bus entlang der gesamten Strecke verteilt. Diese Daten werden üblicherweise mit den Diagnose-Daten übertragen. Das Prinzip nutzt jede Befahrung eines Gleiselementes durch den Zug. Die Befahrung wird detektiert und ist bei jedem Stellwerk oder jeder angeschlossenen BÜSA abrufbar, weshalb die Zugposition an jedem Gleiselement der Strecke bekannt ist. Wie die Abbildung 5-4 beispielhaft zeigt, kann ein Achszähler der vor dem Einschaltkontakt liegt zur Aktivierung der Sperrzeit  $t_{WP}$  genutzt werden.

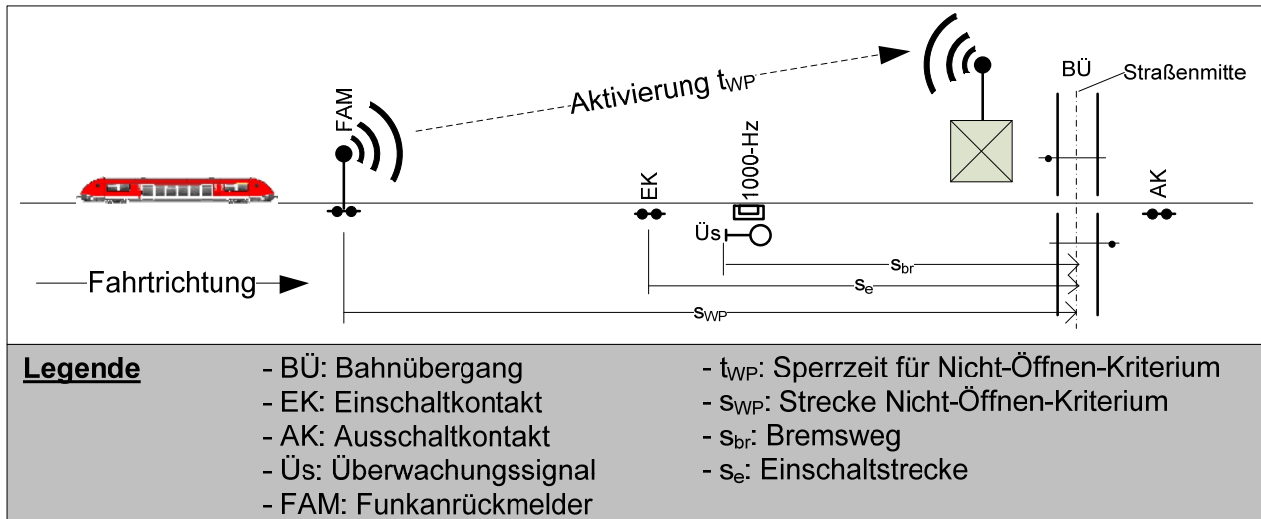


### Abbildung 5-4: Prinzipskizze ÜS mit Daten-Bus

Mit diesem Verfahren wird die Bevorrechtigung des Straßenverkehrs verhindert und die Betriebshemmung gemindert. Diese Variante ist bei Geschwindigkeiten über  $v_{Tfz} = 120 \text{ km/h}$  zu favorisieren, da ein neu zu installierender Wirkpunkt zu weit vor dem BÜ installiert werden müsste: hohe Aufwendungen für die Installation von Kabeln wären die Folge.

#### Betrieb mit ÜS und Funkanrückmelder

Asbrock und Lachmann [AL08] beschreiben einen Funkanrückmelder (FAM), der im Rahmen von optiBÜSA zur Aktivierung des Nicht-Öffnen-Kriteriums dem Einschaltkontakt (EK) vorge-lagert installiert wird (siehe Abbildung 5-5).



**Abbildung 5-5: Prinzipskizze ÜS mit Funkanrückmelder**

Durch den geringen Stromverbrauch kann die Versorgung über Solar-Technik vorgenommen werden (vgl. [AL08]). Aufgrund dieser energieautarken Systemeigenschaften ist eine Anbin-dung an ein fixes Versorgungsnetz nicht notwendig. Dadurch können aufwändige Erschlie-Bungsarbeiten entfallen. Der FAM wird entsprechend des schnellsten Zuges dieser Strecke vor dem Einschaltkontakt zur Aktivierung der Sperrzeit  $t_{WP}$  installiert. Mit Befahren des FAM wird ein Signal an die BÜ-Steuerung übermittelt, die wiederum den Bahnübergang für den Stra-ßenverkehr verriegelt. Damit wird einem potenziellen Öffnungswunsch nicht unmittelbar nachgekommen. Erst wenn der Zug den Ausschaltkontakt befahren hat, wird die BÜSA dem Straßenverkehr wieder freigegeben und die Schranken können geöffnet werden. Dadurch werden die Nachteile von ÜS bei Schranken mit bedarfsgesteuerter Funktionsweise optimiert und eine Bevorrechtigung der Straße gegenüber der Schiene vermieden. Der FAM benötigt keine sicherheitsrelevanten Eigenschaften, da die Sicherheit durch die Komponenten der Überwachungsart selbst gewährleistet ist. Wenn die Entwicklung des Funkanrückmelders da-hingehend fortgeführt wird, dass diese Komponenten auch als signaltechnisch sichere Ein-schaltelemente genutzt werden können, kann bei optiBÜSA auf den EK verzichtet werden.

Aufgrund der autarken Funktionsweise, der autarken Stromversorgung und der damit einher-gehenden finanziellen Aufwendungen hinsichtlich der Verkabelung ist die Variante mit dem Funkanrückmelder gegenüber einem auf den Wirkpunkt verschobenen Einschaltkontakt als kostengünstiger einzustufen. Neben den betrieblichen Vorteilen ist dieser Einsatz auch aus wirtschaftlicher Betrachtung zu empfehlen.

## 5.2 Technologiekonzept

Neben der selbstständig arbeitenden Überwachungsart wird ein innovatives Technologiekonzept die weiteren Grundfunktionen ermöglichen. Die erforderlichen Komponenten des Konzeptes optiBÜSA lassen sich in Komponenten der autark wirkenden BÜ-Sicherung und Überwachungsart sowie Komponenten zur Automatisierung der Grundfunktionen Bedarfserkennung, Rückstauerkennung und Gefahrenraumüberwachung unterteilen.

### 5.2.1 Komponenten der BÜ-Sicherung

Die Komponenten für die Überwachungsart und die BÜ-Sicherung können aus bestehenden BÜSA-Komponenten zusammengestellt werden. Aus der Festlegung des Betriebskonzeptes ergeben sich die in Tabelle 5-2 aufgeführten Bestandteile für optiBÜSA.

Komponente	Erläuterung
Schranken	Der betriebliche Prozess der Anrufschränke soll erhalten bleiben. Daher müssen Schranken eingesetzt werden, die in Grundstellung geschlossen sind.
Lichtzeichen	Gemäß den rechtlichen Vorgaben müssen Lichtzeichen eingesetzt werden (vgl. [SVO01], [DB08a]). Zur Vermeidung von gefährlichen Situationen durch nachfahrende Fahrzeuge, sind die Lichtzeichen (rot/gelb) ausreichend lang vor dem Schrankenschließen zu aktivieren. Mit der in Grundstellung ausgeschalteten BÜSA werden die Lichtzeichen bei Erkennung des Querungswunsches bis die Schranken geöffnet werden aktiviert.
Andreaskreuz	Gemäß rechtlicher Vorgaben müssen Andreaskreuze eingesetzt werden (vgl. [SVO01], [DB08a]).
Kabel	Zur Informationsübertragung vom Befahren Einschalt- / Ausschaltelement zur BÜSA. Zur Informationsübertragung der BÜSA-Funktionen.
BÜ-Steuerung	Die BÜ-Steuerung ermöglicht die Koordination der Informationen und die Ansteuerung der Komponenten.
Schaltheis	Das Schaltheis der BÜSA befindet sich unmittelbar in der Nähe des Bahnübergangs und beinhaltet die BÜ-Steuerung.
Energieversorgung	Für die Energieversorgung der BÜSA wird ein Energieanschluss benötigt.
Diagnose	Für Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen sowie zur Fehlermeldung
Einschaltkontakt	Gleisschaltmittel für die Einschaltung
Ausschaltkontakt	Gleisschaltmittel für die Ausschaltung
Überwachungssignal	Anzeige BÜ0 und BÜ1 zur Signalisierung des BÜ-Zustands gegenüber dem Triebfahrzeugführer
1000-Hz-Magnet (Indusi)	Bei Missachtung eines haltzeigenden Überwachungssignals wird durch diesen Magneten die Zugbeeinflussung realisiert.
HET (Hilfseinschalttaste) / Automatik-HET	Für Rangier- oder Bautätigkeiten/Wartungsarbeiten im Bereich der BÜSA ist es möglich, über UT (Unwirksamkeitstaste) und HET (Hilfseinschalttaste) die BÜSA per Hand entweder unwirksam zu schalten oder einzuschalten bzw. dies über Automatik-HET mit dem Zug durchzuführen.
Unwirksamkeitstaste	
Funkanrückmelder	Dieser dient der Anrückmeldung von Zügen, die sich dem Bahnübergang nähern. Mit Hilfe des Funkanrückmelders wird die BÜSA hinsichtlich einer Öffnung für den Straßenverkehr vorübergehend gesperrt (Nicht-Öffnen-Kriterium).
Taster	Der Taster erfüllt die Funktion der Bedarfserkennung. Die Technologie wird dem Taster von der Alttechnik Anrufschränke angepasst, jedoch ohne Kommunikation zu einem Bediener. Über den Taster erfolgt die Informationsweitergabe an die BÜ-Steuerung.
Anzeige am Taster	Der Taster wird mit einem Anzeigefeld für die Kommunikation zum Straßenverkehrsteilnehmer ergänzt. Diese wird dem Straßenverkehrsteilnehmer durch Anzeigen, wie beispielsweise „Achtung, Schranken öffnen“ oder „Bitte warten, Zug kommt“ mitteilen, dass er erkannt wurde und die Anlage betriebsbereit ist.

Tabelle 5-2: Komponenten der BÜ-Sicherung bei optiBÜSA

Für die Automatisierung der Grundfunktionen Bedarfserkennung, Rückstauerkennung und Gefahrenraumüberwachung wurde in Kapitel 4 der Bedarf zur Entwicklung eines neuen Technologiekonzepts, für das ein Stereo-Kamera-System die Basis bildet, hergeleitet. Im Kapitel 5.2.2 werden die Anforderungen an das Stereo-Kamera-System spezifiziert.

### 5.2.2 Stereo-Kamera-System zur Hinderniserkennung

Hierzu wird das grundlegende technologische Design zur Hinderniserkennung am Bahnübergang vorgestellt. Dabei wird auf der vorhandenen Basis des Funktionsdemonstrators aus dem Projekt RCAS aufgesetzt. Die Bildverarbeitung, die für die Objektextraktion zur Erkennung von Hindernissen im Gefahrenraum und ableiten von Gefahrensituationen erforderlich ist, fehlt derzeit und ist nicht Bestandteil dieser Arbeit. Mit den nachfolgend beschriebenen Eigenschaften wird dieser Entwicklungsschritt entsprechend bahnspezifischer Kriterien vorbereitet.

#### Grundlegender Aufbau des Stereo-Kamera-Systems

Für den vorgesehenen Einsatzbereich ist es möglich (vgl. [DB03]) und bevorzugt (vgl. Kapitel 4.2.2), digitale Bilder im sichtbaren Spektralbereich aufzunehmen. Laut Winter [Win09] ist es sinnvoll, eine Stereo-Kamera mit einer zusätzlichen Beleuchtungsquelle (z.B. Infrarot) auszustatten. Mit Hilfe von Infrarot lassen sich Probleme mit zu schwacher Beleuchtung (Dunkelheit) umgehen, weshalb sich dieses Verfahren laut [VG02] für Außenanwendungen besonders eignet. Wie in RCAS gezeigt wurde, ist durch Stereo-Kameras eine besonders präzise Erfassung von dreidimensionalen (3D) Objekten in Echtzeit möglich. Die Stereo-Kamera erfasst einen zu definierenden Bereich, so dass in diesem befindliche 3D-Objekte durch eine Bildverarbeitung erkannt werden. Die hierfür erforderliche Objektextraktion muss für den spezifischen Anwendungsfall entwickelt werden. Aus den zu erfassenden Daten müssen Informationen zur Bedarfserkennung, Rückstauerkennung und Gefahrenraumerfassung generiert werden. Zur Datenerfassung werden von den Kamerasensoren Bilder an einen 3D-Rechner (mit FPGA) mit zugehöriger Bildauswertungssoftware mit -algorithmus gesendet. Dort werden die Bilder verarbeitet und eine 3D-Tiefenkarte der aufgenommenen Szene erstellt (vgl. Kapitel 4.2.2). Auf Basis dieser Karte wird zukünftig die Objektextraktion durchgeführt. Mittels opti-BÜSA-Logik (vgl. Kapitel 5.3) werden die erforderlichen Informationen an die BÜ-Steuerung weitergeleitet. Für den Hardware-Aufbau des optischen Systems wurde die in Abbildung 5-6 dargestellte Architektur gewählt.

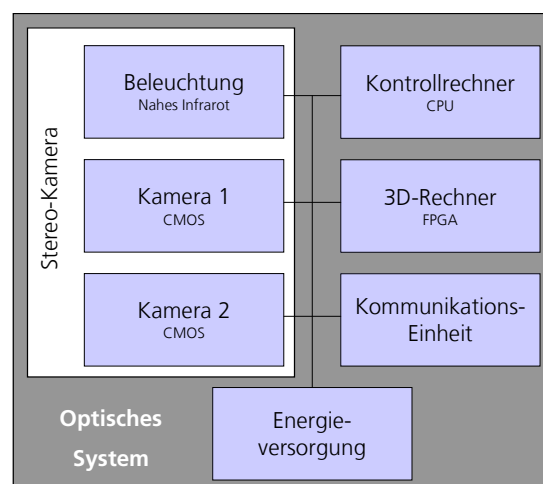


Abbildung 5-6: Systemarchitektur des optischen Systems aus dem Projekt RCAS [GPB+09]

Mit dem zu berücksichtigenden Obsoleszenzverhalten der verbauten Komponenten wird die Nutzung von Standardkomponenten bevorzugt. Die CMOS Sensoren sind deshalb besonders geeignet (vgl. Kapitel 4.2.2). Die Kommunikationseinheit zur Übertragung der Informationen an die BÜ-Steuerung und zwischen den System-Komponenten selbst ist ebenfalls mit Standardkomponenten umsetzbar. Das System muss zur Erfüllung der Anforderungen aus der Norm DIN EN 50125-2/-3 (z.B. Funktionsfähigkeit im Temperaturbereich zwischen -40°C und +70°C, vgl. [DIN03]) und zum weitestgehenden Ausschluss von Beeinträchtigungen durch Umwelteinflüsse wie Niederschlag, Insekten etc. auf einem beheizbaren Kameragehäuse mit Scheibenheizung und der Möglichkeit zur Reinigung dieser aufgebaut werden.

### Anordnung des Stereo-Kamera-Systems am Bahnübergang

Aus den spezifischen Anforderungen zur Hinderniserkennung (Objektextraktion und die Weitergabe der Ergebnisse an die BÜ-Steuerung) und den Eigenschaften der RCAS-Technologie ergeben sich im Detail nachfolgend aufgeführte Gestaltungsempfehlungen, die für das Gesamtsystem der optiBÜSA-Technologie im Rahmen der Arbeit entwickelt wurden. Die Vorrichtung sieht für die Umsetzung der Überwachung zunächst<sup>2</sup> vier Stereo-Kameras vor (vgl. Abbildung 5-7). An den Übergängen der Erfassungsbereiche der Sensoren wird es zu Überlappungen in der Bildverarbeitung kommen. Die Herausforderung wird hier in der Fusion der Sensordaten der einzelnen Stereo-Kameras bestehen (vgl. [Cat11]).

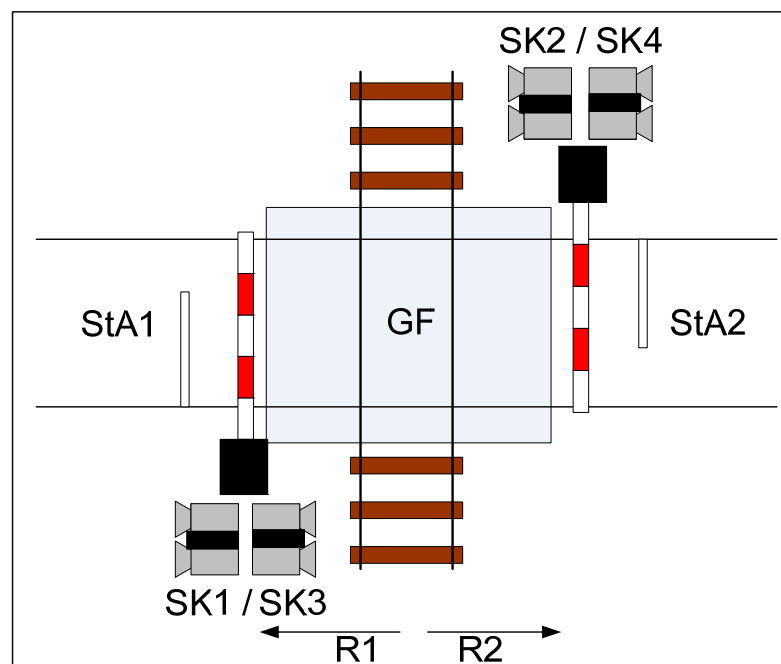


Abbildung 5-7: Anordnung der Stereo-Kameras am Bahnübergang

<sup>2</sup> Das endgültige Systemdesign wird erst nach ausgiebigen Tests im Rahmen einer Demonstrationsphase festgelegt. Je nach Gestaltung der Bahnübergänge ist es vorstellbar, dass ein System bestehend aus zwei Stereo-Kameras sämtliche Anforderungen erfüllt. Für die Beschreibung und für das bessere Verständnis der Sicherheitslogik (siehe Kapitel 5.3) wird das System mit vier Stereo-Kameras beschrieben.



Die nachfolgende Erläuterung der Anordnung der Sensoren an einem BÜ ist für eine Richtung, die ein Straßenverkehrsteilnehmer zum Überqueren des BÜ wählen kann, beschrieben und gilt entsprechend für beide Richtungen:

- Eine erste Stereo-Kamera (SK1), zum Aufnehmen des ersten Straßenabschnitts (StA1) in einer ersten Richtung (R1) – so wird der Sektor 1 detektiert.
- Eine zweite Stereo-Kamera (SK2), zum Aufnehmen des Gefahrenraums und/oder des StA1 in R1 – so werden die Sektoren 3 und 2 detektiert.
- Eine dritte Stereo-Kamera (SK3), zum Aufnehmen des GF und/oder des zweiten Straßenabschnitts (StA2) in R2 – so werden die Sektoren 3 und 2 detektiert.
- Eine vierte Stereo-Kamera (SK4) zum Aufnehmen des StA2 in R2.
- Ein Verarbeitungsprogramm, welches die Bilder der SK1 bis SK4 empfängt und für die Bildauswertung und -verarbeitung zuständig ist.

Die Vorrichtung ist dadurch gekennzeichnet, dass die Stereo-Kamera SK3 in unmittelbarer Nähe zur SK1 angeordnet ist und eine Januskopf-Anordnung bilden, wie dies vom römischen Gott Janus bekannt ist (vgl. Abbildung 5-8). Die Stereo-Kameras SK2 und SK4 bilden ebenfalls eine Januskopf-Anordnung. Diese Paare werden jeweils an einem Straßenabschnitt (StA1/StA2) installiert und in entgegengesetzten Richtungen ausgerichtet. Dadurch erfasst das resultierende Sichtfeld alle Bereiche des Bahnübergangs.

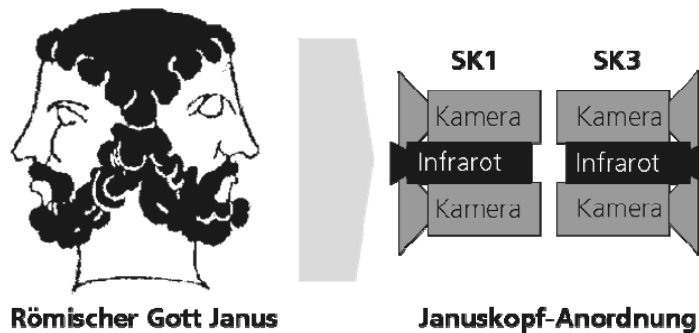
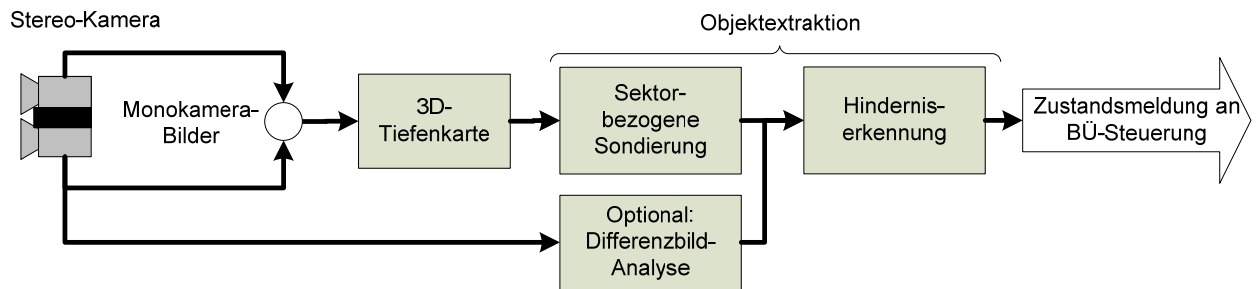


Abbildung 5-8: Januskopf-Anordnung

Bevorzugt ist eine starre Montagevorrichtung. Als geeigneter Ort für die Montage der Stereo-Kameras wird der Mast des Andreaskreuzes gesehen (siehe Kapitel 5.2.3, vgl. [Pel08b]).

### Anforderungen an die Bildverarbeitung für den spezifischen Anwendungsfall

Die Aufgabe der Bildverarbeitung besteht darin, Veränderungen für jeden Bildpunkt (Pixel) des aufgenommenen Bildes und die Größe eines Objektes mittels 3D-Tiefenkarte zu erkennen, eine Objektextraktion (sektorenbezogene Sondierung und Hinderniserkennung) durchzuführen, sowie den ermittelten Zustand (Detektion eines Objektes) an die BÜ-Steuerung zu melden. Für die optiBÜSA-Bildverarbeitung wird eine Hinderniserkennung mittels Abstandsmessung aus den Informationen der 3D-Tiefenkarte vorgeschlagen. Aufgrund der verfügbaren digitalen Bilder, die zur Erstellung dieser Karte benötigt werden, ist ein Bildvergleichsalgorithmus mittels Differenzbild-Analyse geeignet, um die Objektextraktion auf Basis der 3D-Tiefenkarte zu unterstützen (siehe Abbildung 5-9). Die anwendungsbezogenen Anforderungen an das Bildverarbeitungskonzept werden nachfolgend vorgestellt.



**Abbildung 5-9: Prozessablauf des Bildverarbeitungskonzepts für optiBÜSA**

#### Hinderniserkennung mittels Abstandsmessung

Die für die Stereo-Kamera erforderlichen beiden Mono-Kameras sind zueinander fest installiert und werden auf den zu detektierenden Sektor ausgerichtet (Kalibrierung). Der Hintergrund der detektierten Sektoren wird sich im nicht belegten Zustand nicht verändern. Sobald eine Veränderung der aufgenommenen Szene detektiert wird, ist von einer Belegung durch ein Hindernis auszugehen. Eine Veränderung wird dann erkannt, sobald sich ein Objekt zwischen Sensor und Hintergrund befindet und dadurch sich in diesem Bildbereich der Abstand verringert. Aus dieser sich verändernden Entfernungsmessung wird durch die Bildverarbeitung ein Hindernis erkannt. Dieses Prinzip wird bereits mittels Stereo-Kameras im Automobilbereich angewendet (vgl. [Win09]) um den Abstand zu vorausfahrenden Fahrzeugen zu ermitteln. Für den Einsatz bei der Hinderniserkennung am Bahnübergang wird ebenfalls der Abstand gemessen, wobei der Abstand von der Sensorik zum Straßenbelag maßgeblich ist.

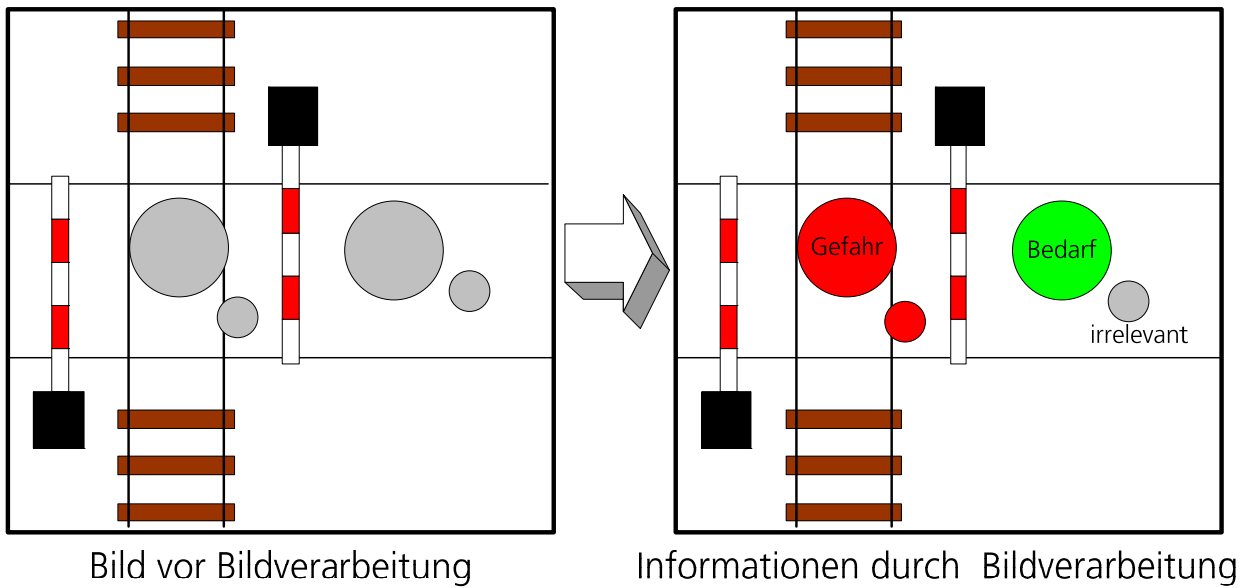
Bei Nebel und anderen extremen Witterungsbedingungen stoßen optische Systeme wie auch die Radar-GFR an die Leistungsgrenze. Hierfür sind betriebliche und technologische Rückfallebenen vorgesehen (vgl. Kapitel 5.3.3). Damit das Stereo-Kamera-System sein mögliches Nichtfunktionieren feststellen kann, wird die Systemumgebung des Bahnübergangs genutzt. Das Andreaskreuz besitzt ein markantes Merkmal (Kreuzform), das sich mittels Objektextraktion von der Umgebung unterscheiden lässt. Wird beispielsweise das Andreaskreuz der Gegenseite durch das Stereo-Kamera-System nicht mehr erkannt bzw. der vorgesehene Abstand kann nicht ermittelt werden, ist von einem nicht ordnungsgemäßen Funktionieren der Hinderniserkennung auszugehen und dieser Zustand an die BÜ-Steuerung zu melden.

#### Sektorbezogene und differenzierende Bildverarbeitung

Aufgrund der verschiedenen Sicherheitsanforderungen innerhalb der Sektoren ist eine nach Funktionen differenzierende Objektextraktion erforderlich.

Mit optischen Systemen ist es prinzipiell möglich, aus einem Bild verschiedene Informationen zu generieren. Hierfür werden die Sektoren differenziert nach Hindernissen gescannt. In Abbildung 5-10 ist beispielhaft das Blickfeld eines Stereo-Kamera-Systems vor und nach der Bildverarbeitung aufgeführt. In den Sektoren zwei und drei ist die Anforderung an die Bildverarbeitung sehr hoch, da hier jedes Hindernis erkannt werden muss. Im ersten Sektor ist es hingegen im Wesentlichen erwünscht, dass größere Objekte (z.B. Automobile) erkannt werden. Ebenfalls muss ein Größenunterschied der Objekte festgestellt werden, damit beispielsweise Tiere keine Bedarfserkennung auslösen. Die Unterscheidung, wann ein Objekt als „groß“ und wann als „klein“ wahrgenommen wird und entsprechende Informationen zur Umsetzung der

Grundfunktionen auslöst, erfolgt in der Bildverarbeitung durch die Objektextraktion aus der Tiefenkarte.



**Abbildung 5-10: Sektorbezogene Auswertung einer Szene**

Für die Grundfunktion Bedarfserkennung ist der Sektor 1 von Belang. In diesem Bereich wird sich ein Straßenverkehrsteilnehmer (StVTn) aufhalten, wenn ein Querungswunsch besteht. Hierfür wird die automatisierte Erkennung der StVTn vor der Schranke benötigt, die durch Erkennung von Unterschieden zwischen Referenzbildern derselben Stelle und der aktuellen Aufnahme bereitgestellt wird. Dabei müssen folgende Informationen von der Bildverarbeitung zur weiteren Verarbeitung bereitgestellt werden:

- Besteht ein Öffnungswunsch zur Querung des Bahnübergangs (JA/NEIN)?
- Unterschiede zwischen den Bildern zum Zeitpunkt  $t_n$  im Vergleich mit  $t_{n+1}$ ?
- Ist es ein StVTn oder handelt es sich um Störungen?

Bei der Grundfunktion Rückstauerkennung wird die Funktion „Überwachen des Schrankenschließens“ benötigt, die auf den Schrankenschließvorgang bzw. die Bereitschaft zum Schrankenschließen achtet. Hierfür wird die Objektextraktion für den Bereich von Sektor 2 durchgeführt. Es müssen im Wesentlichen folgende Informationen von der Bildverarbeitung zur weiteren Verarbeitung bereitgestellt werden:

- Unterschiede zwischen den Bildern zum Zeitpunkt  $t_n$  im Vergleich mit  $t_{n+1}$ ?
- Ist es ein StVTn oder handelt es sich um Störungen?
- Befindet sich ein StVTn unterhalb der Schranken bzw. staut sich der Verkehr in den Gefahrenraum?

Für die Grundfunktion Rückstauerkennung wird darüber hinaus die Funktion „Erfolgte Querung erkannt“ benötigt. Hierfür werden insgesamt in den Sektoren eins bis drei Detektionen stattfinden, da erkannt werden muss, ob ein Fahrzeug in den Gefahrenraum hineinragt. Hierbei müssen im Wesentlichen folgende Informationen extrahiert werden:

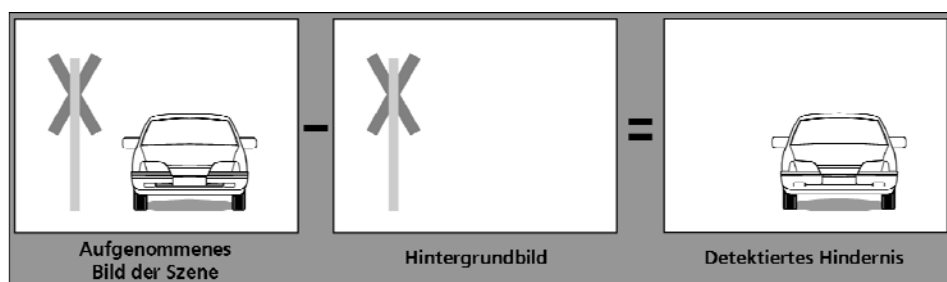
- Unterschiede zwischen den Bildern zum Zeitpunkt  $t_n$  im Vergleich mit  $t_{n+1}$ ?
- Ist es ein StVTn oder handelt es sich um Störungen?
- Befindet sich ein StVTn unterhalb der Schranken?
- Ragt ein Fahrzeug in den Gefahrenraum?

Der Sektor 2 muss hierfür frei von Gegenständen sein. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, den StVTn, der den Querungsvorgang eingeleitet hat, zu verfolgen und ihn im Sektor 1 der gegenüberliegenden Seite zu detektieren, um so den erfolgreichen Querungsvorgang festzustellen. Diese Informationen müssen ausgewertet werden, so dass gegebenenfalls ein Schrankenschließen und damit eine Fahrtfreigabe für den Zug verhindert wird.

In einem weiteren Schritt wird für die Grundfunktion Gefahrenraumüberwachung der Sektor 3 einzeln betrachtet, um die Funktion „Gefahrenraumfreimeldung“ durchzuführen, die nur erfolgen darf, wenn sich tatsächlich kein Gegenstand innerhalb dieses Sektors befindet.

#### Differenzbild-Analyse

Durch Bildvergleiche, die unabhängig von einem Stereo-Kamera-System durchgeführt werden können, wird die Hinderniserkennung unterstützt. Hierbei ist die wichtigste Eigenschaft der Anrufschränke (Schränken sind in Grundstellung geschlossen) besonders vorteilhaft für den Einsatz optischer Systeme. Erst dadurch ist es möglich, ein Bild des Gefahrenbereiches kurz vor dessen Freigabe für den Straßenverkehr aufzunehmen, um dieses als Referenzbild für die Gefahrenraumfreimeldung vor dem Schließen der Schranken nutzen zu können. Damit werden die sich verändernden Umgebungsbedingungen und deren möglicher Einfluss auf die Bildverarbeitung reduziert. Zur Detektion sich nicht bewegendender Umgebungsszenen eignet sich daher eine Differenzbild-Analyse (oder auch Bildvergleichermethode genannt, vgl. [PNK07]), bei der die sich nicht verändernden Gegenstände der Szene (Hintergrund) ausgeblendet, d.h. aus der Bildinformation entfernt werden und nur die Veränderungen der Szene übrig bleiben, die dann als Hindernis ausgegeben werden (vgl. Abbildung 5-11).



**Abbildung 5-11: Ziel der Differenzbild-Analyse**

Die Sensoren sind auf den auszuwertenden Hintergrund auszurichten, so dass die dort fest installierten Objekte der Umgebung für die Differenzbild-Analyse und für andere Anwendungen der optiBÜSA-Bildverarbeitung als Referenzpunkt (Landmark) genutzt werden können.

### **5.2.3 Detailexperimente mit der Stereo-Kamera**

Dieses Stereo-Kamera-System wird nur dann eine Bahntauglichkeit erreichen, wenn die einzelnen Systemkomponenten (Sensoren, Beleuchtungsquelle, Rechnertechnik und Bildverarbeitung) applikationsbezogen ausgewählt und aufeinander abgestimmt sind (vgl. [Sch03],

[MK05], [Lan05], [Bör05]). Die Bahntauglichkeit muss nachgewiesen und das System zugelassen werden. Damit dies gelingt, müssen umfangreiche Demonstrationen und Langzeittests realisiert werden. Die Arbeit liefert hierfür wertvolle Vorarbeiten.

### Aufbau Funktionsdemonstrator

Zur Erprobung und zum Nachweis der generellen Einsetzbarkeit optischer Systeme am Bahnübergang wurde ein Funktionsdemonstrator mit der in RCAS entwickelten Stereo-Kamera errichtet und am Forschungsbahnübergang (siehe Abbildung 5-12 [Fotos: Autor]) des Labors RailSiTe® (Rail Simulation and Testing) sowie an einer Anrufschrake (siehe Abbildung 5-13 [Fotos: Autor]) eingesetzt. Ziel war es, die Fähigkeit der Stereo-Kamera zur Hinderniserkennung im Gefahrenraum zu zeigen und einen geeigneten Sensorstandort zu identifizieren.

Der Funktionsdemonstrator bestand aus folgenden Komponenten:

- Eine Stereo-Kamera bestehend aus zwei Mono-Kameras (die Sensoren wurden zur inneren Orientierung zueinander und mit GPS (Global Positioning System), zur zeitlich synchronen Bildauswertung kalibriert). Die Bildaufnahme erfolgte mit den Parametern: Framerate 10 Hz, bei Auflösungen von 1024x800 Pixel & 1380x1024 Pixel
- Gehäuse – zum Schutz der Kamera vor Niederschlag während der Messungen
- Schwenk-Neige-Kopf – für die optimale Ausrichtung der Sensorik
- Stativ (höhenverstellbar) – für die Messungen unterschiedlicher Höhen an verschiedenen Positionen am Bahnübergang
- Laptop und Controller – zur Datenaufzeichnung
- Pylone – für die Simulation der Abmessung von Gleisen und Straße

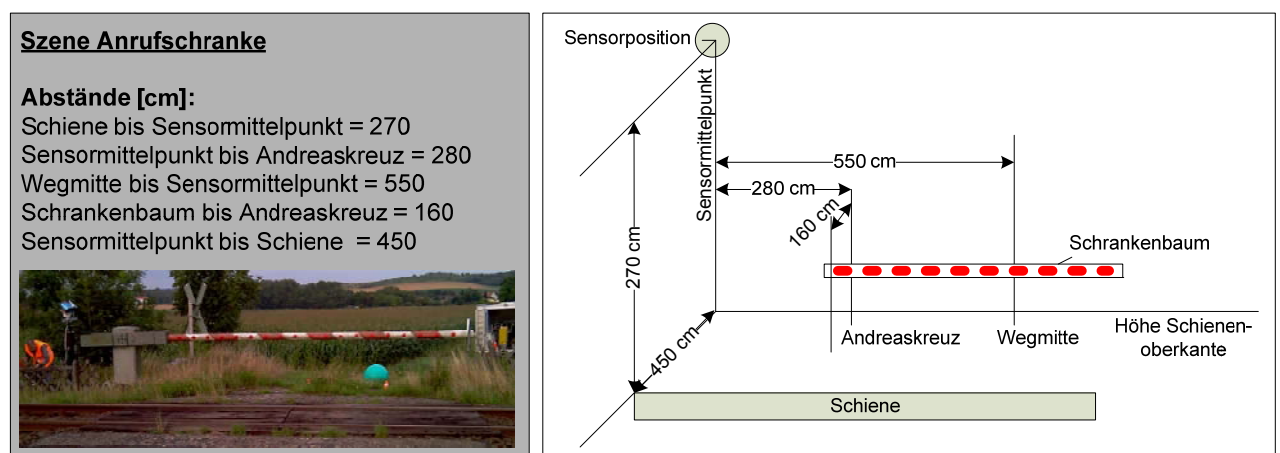


Abbildung 5-12: Ausrüstungsbestandteile des Funktionsdemonstrators



**Abbildung 5-13: Aufbau des Funktionsdemonstrators am Anrufschrakenbahnübergang**

Der Messaufbau zur äußeren Orientierung wurde entsprechend der bahnspezifisch möglichen Standorte (z.B. vor den Schranken und nicht im Gefahrenraum) ausgewählt. Schließlich wurde für die Messungen am Forschungsbahnübergang und an der Anrufschrake, wie die in Abbildung 5-14 beispielhaft darstellt, die Szene erfasst.



**Abbildung 5-14: Beschreibung der Szene am Anrufschrakenbahnübergang**

### Detailexperimente

Die Ziele der ersten Detailexperimente waren die

- Ermittlung der optimalen Position der Sensoren am Bahnübergang und
- Aufnahme verschiedener Bilder nach betrieblich relevanten Szenarien des Konzepts optiBÜSA und Überprüfung der Einsetzbarkeit des Systemkonzepts zur Hinderniserkennung (inklusive Generierung der entsprechenden 3D-Tiefenkarten).

Die Detailexperimente zur Standortidentifikation konnten im Ergebnis Aufschluss über die grundlegende Anordnung der Sensoren am Bahnübergang geben. Im Einzelnen kann zusammenfassend festgestellt werden:



- Geeignete Höhe: Die Sensoren sollten eine Höhe von  $h = 5$  m über der Gleisoberkante nicht unterschreiten, da so die Sektoren optimal detektiert werden können.
- Anbringung: Die Januskopf-Anordnung sollte auf dem Mast für die Andreaskreuze und oberhalb der Lichtzeichen installiert werden. Der Mast ist an jedem Bahnübergang installiert und ermöglicht es, auf Baumaßnahmen zur Anbringung eines zusätzlichen Mastes oder dergleichen zu verzichten. Der Standard-Mast des Andreaskreuzes hat eine Höhe von  $h = 4,5$  m (Abstand zur Fahrbahnoberfläche [SB99]), wodurch ein gewisser Schutz vor Vandalismus gegeben ist. Von dieser Position sind sowohl der Sektor 1 und die Sektoren 2 und 3 bei eingleisigen Strecken ausreichend detektierbar [Pel08b]. Alternativ ist die Positionierung der Kamera auf einem sogenannten Peitschenmast möglich, der statt des Standardmastes für die Installation der Lichtzeichen und des Andreaskreuzes installiert werden kann.

Einen weiteren Vorteil birgt diese Installation insofern, als dass mögliche Verdeckungen durch das Andreaskreuz oder die Schrankenbäume vermieden werden (vgl. Abbildung 5-15). Für den Fall, dass ein Objekt eine Gefahr darstellt ist die Entdeckung gewünscht. Wird ein Objekt verdeckt, ist dies ein ungewolltes Ereignis, das verhindert werden muss.

**Verdeckung des Menschen hinter dem Andreaskreuz**



**Abbildung 5-15: Beispiel für eine Verdeckungen**

Festgestellt werden konnte weiterhin, dass sich das Andreaskreuz aufgrund seiner markanten Form als Landmark eignet. Solange das System durch die beiden den Gefahrenraum detektierenden Stereo-Kameras jeweils das gegenüberliegende Andreaskreuz erkennt (siehe Abbildung 5-16), wird von der Funktionsfähigkeit des Systems ausgegangen. Sobald diese Landmarks nicht detektiert werden, wird eine Fehlermeldung ausgegeben. Diese Anforderung wird bei erfolgreicher Umsetzung des o. g. Systemdesigns erfüllt.

Insgesamt wurden die Auswirkungen von Schattenwurf hinsichtlich fehlerhafter Erkennung von Objekten, Verdeckungen von zu detektierenden Objekten durch die direkte Sicht verhindernde Objekte, Erkennung von Andreaskreuz und Schranken sowie die Erkennung von Menschen und Fahrzeugen an einem realen Bahnübergang simuliert. Weiterhin wurden die Funktionen „Gefahrenraum frei“, „Gefahrenraum belegt“, „Bedarf zum Öffnen besteht“ und „Querung erfolgt“ zur potentiellen Weiterverarbeitung und Ausgabe als Informationen simuliert. Im Nachgang wurden die Tiefenkarten erstellt und entsprechend der aufgestellten Szenarien ausgewertet (siehe Abbildung 5-17).

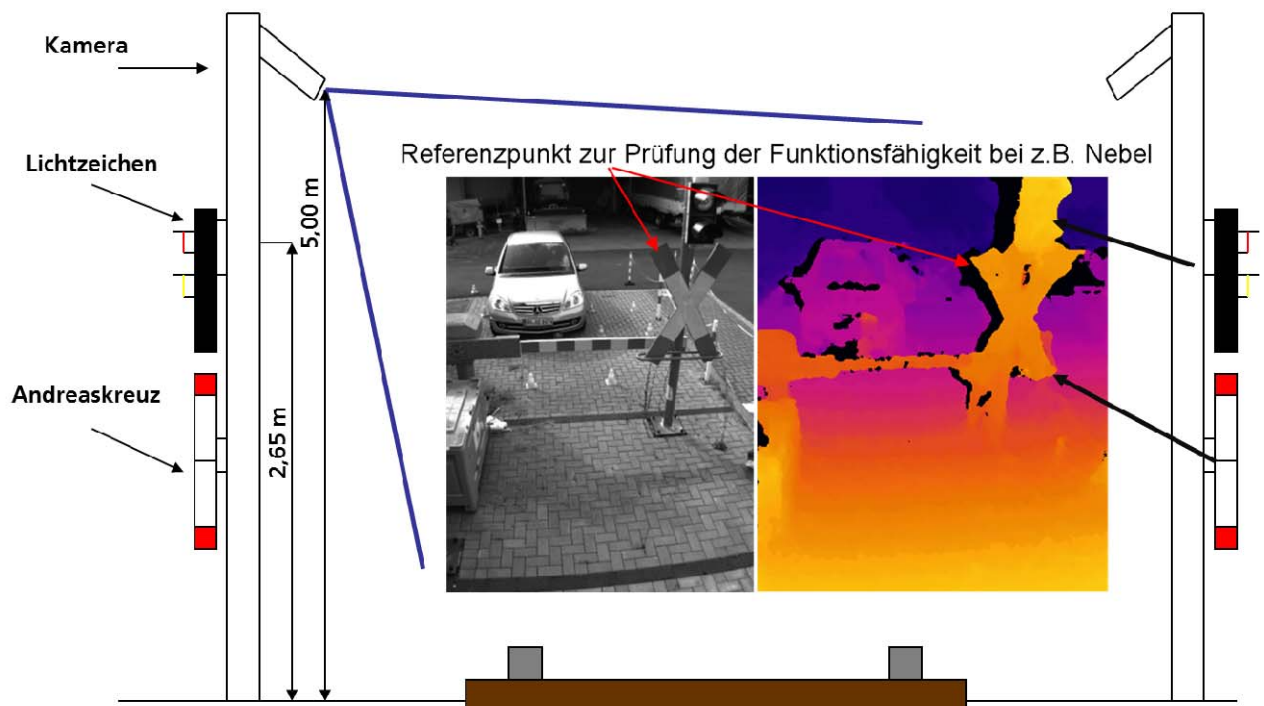


Abbildung 5-16: Andreaskreuz als Landmarker zur Referenz

Anforderung	Funktion	Ergebnis des Stereo-Kamera-Systems		Auswertung
Gefahrenraum vollständig detektieren	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Rückstauererkennung</li> <li>- Gefahrenraumüberwachung</li> <li>- Hinderniserkennung</li> <li>- Kollisionsvermeidung</li> </ul>			Die Schranken als Begrenzung des Gefahrenraums sind erkennbar, wie auch die Schienen.
Auto detektieren	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Automatisierte Bedarfserkennung</li> <li>- Rückstauererkennung</li> <li>- Gefahrenraumüberwachung</li> </ul>			Das Fahrzeug hebt sich deutlich vom Untergrund des Gefahrenraums ab. Eine Detektion in allen Sektoren ist möglich.
Menschen detektieren	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gefahrenraumüberwachung</li> </ul>			Der Mensch hebt sich deutlich vom Untergrund des Gefahrenraums ab. Eine Detektion ist möglich.
Schattenschlag nicht detektieren	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vermeidung von Fehlinterpretationen</li> </ul>			Das Hindernis wird erkannt (hier Ball), der Schatten des Hindernisses wird in der Tiefenkarte nicht ermittelt.
Andreaskreuz und Schranken detektieren	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Verwendung als Landmarks zur Überprüfung der Funktionsfähigkeit</li> <li>- Bei Differenzbild-Analyse als Hintergrund extrahieren</li> <li>- Schrankenschließen überwachen</li> </ul>			Sowohl Andreaskreuz mit der markanten Form, als auch die Schranken sind eindeutig erkennbar. Eine Verwendung als Landmark ist gegeben.

Abbildung 5-17: Auszug der Messergebnisse mit dem Funktionsdemonstrator



Bisher ist noch keine automatische Erkennung umgesetzt. Bei den Messungen war es das Ziel, zunächst durch Menschen zu erkennen ob die Basisdaten für eine Objekterkennung und dann die Ableitung von Gefahrensituationen hinreichend sind. Die Messergebnisse lassen den Schluss zu, dass die Voraussetzungen günstig sind. Für den Bereich vor den Schranken gelten geringere Anforderungen, da hier fehlerhafte Detektionen nur den Betrieb hemmende aber nicht sicherheitskritische Auswirkungen haben.

## 5.3 Sicherungskonzept

Nachfolgend wird das Sicherungskonzept erläutert, welches das zuvor beschriebene Technologiekonzept nutzt, um entsprechend des bedarfsgesteuerten Betriebskonzepts die Logik des Sicherns (optiBÜSA-Logik) für das Sicherungsverfahren zu beschreiben (siehe Abbildung 5-18). Die erforderliche Hinderniserkennung wird in dieser Arbeit nicht umgesetzt, jedoch wird mit dem Sicherungskonzept die dafür erforderliche Logik für die Ansteuerung und Abfrage des Stereo-Kamera-Systems entwickeln. Die optiBÜSA-Logik fungiert als Bindeglied zwischen der BÜ-Steuerung und den Komponenten. Der Januskopfalgorithmus (siehe Kapitel 5.3.1) spezifiziert die Anforderungen an die zu entwickelnde sektorbezogene Objektextraktion. Hierfür wird die optiBÜSA-Logik für die Stereo-Kamera-GFR und für die BÜ-Sicherung des Gesamtsystems erläutert. Anschließend wird das Rückfallebenenkonzept vorgestellt.

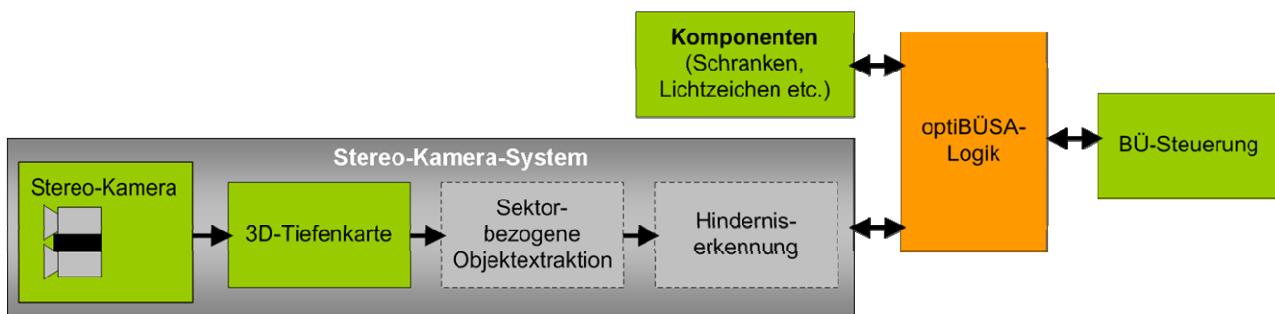


Abbildung 5-18: Anordnung der optiBÜSA-Logik in der Systemarchitektur

### 5.3.1 Logik der GFR für bedarfsgesteuerte Schranken

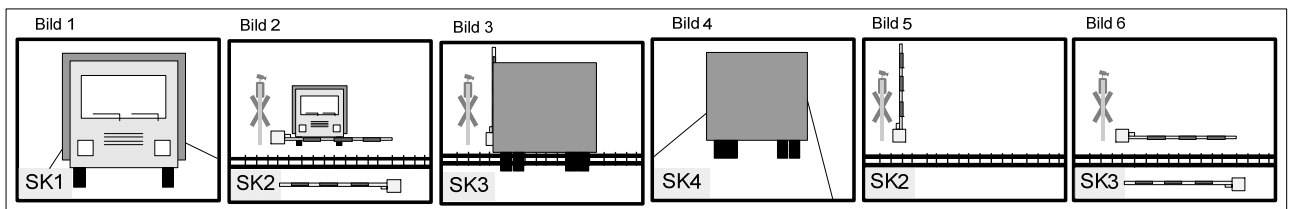
Das in Kapitel 5.2.2 beschriebene Stereo-Kamera-System ist der Funktionsträger der Grundfunktion „Technische Gefahrenraumüberwachung“. Zunächst wird das System ohne die Informationsweitergabe an die BÜ-Steuerung diskutiert. Auf das Zusammenwirken aller Systeme wird in Kapitel 5.3.2 eingegangen.

#### Abfolge einer Sequenz des Januskopfalgorithmus

In Vorbereitung für ein zukünftiges Bildverarbeitungsverfahren zur sicheren Gefahrenraumüberwachung wird hier die Funktionsweise des Systems beschrieben. Das grundlegende Verfahren wird durch einen Algorithmus abgebildet, der nachfolgend als Januskopfalgorithmus bezeichnet wird und eine vollständige Querungssequenz der Straßenseite umfasst. Die Bildsequenz der Abbildung 5-19 dient als Basis der anschließenden Erläuterung.

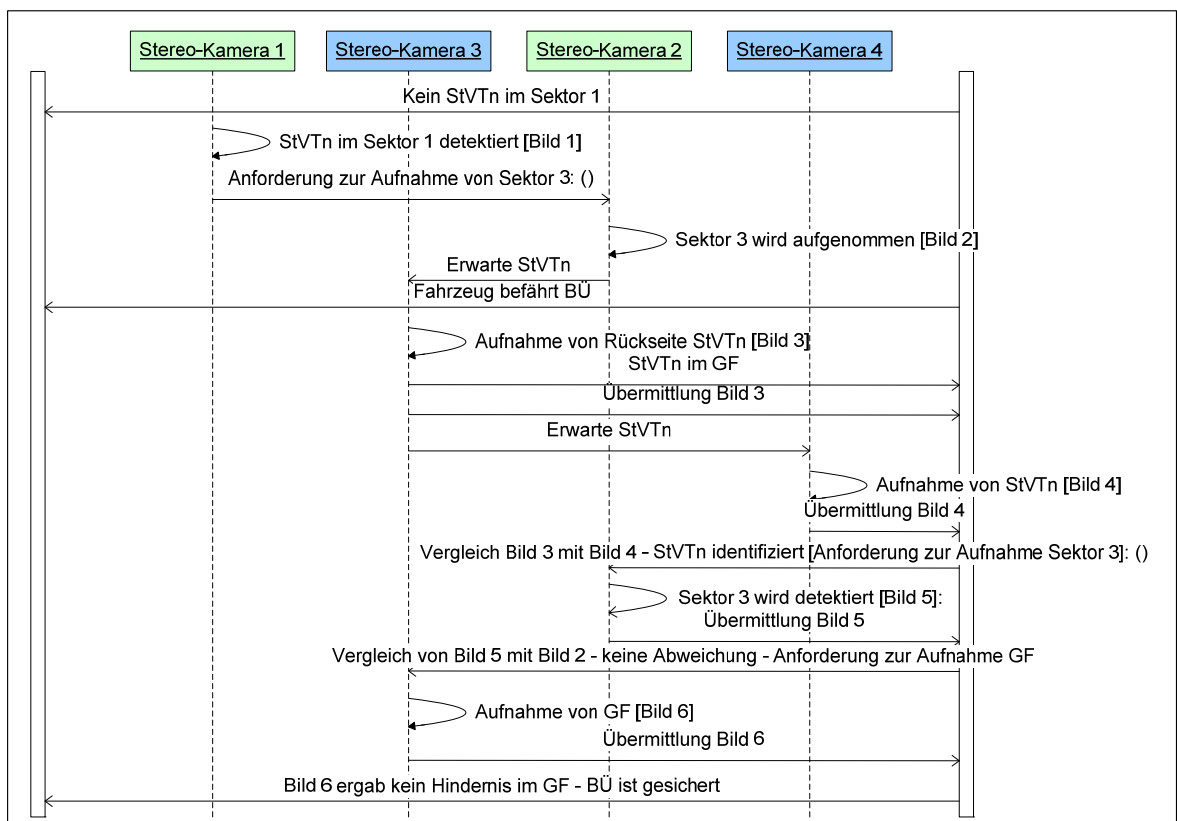
- Aufnehmen eines Vorderseitenbildes (Bild 1) des ersten Straßenabschnitts (StA1) und einer Vorderseite eines auf dem StA1 befindlichen Objektes mit der Stereo-Kamera SK1 in der ersten Richtung R1.

- Danach Aufnahmen eines Bildes (Bild 2) des Gefahrenraums (GF) und/oder des StA1 in R1 mit der Stereo-Kamera SK2 vor dem Öffnen der Schranken. Die Stereo-Kameras SK2 und SK3 werden durch das System erst aktiviert, wenn der Januskopfalgorithmus durch die Bedarfsmeldung per Taster oder durch Detektion von Fahrzeugen im Sektor 1 gestartet wird.
- Aufnahmen eines Rückseitenbildes (Bild 3) des GF und/oder des StA2 und der Rückseite des im GF auf dem StA2 befindlichen Objektes in der zweiten Richtung R2 durch SK3.
- Aufnahmen des zweiten Straßenabschnitts StA2 (Bild 4) in R2 durch SK4
- Aufnahmen eines Bildes (Bild 5) des GF und/oder des StA1 in R1 mit SK2 vor dem Schließen der Schranken
- Aufnahmen eines Bildes (Bild 6) des GF und/oder des StA2 in R2 mit SK3 nach dem Schließen der Schranken



**Abbildung 5-19: Bilder für Sequenz des Januskopfalgorithmus**

Die Abbildung 5-20 beschreibt eine beispielhafte Betrachtung für eine Richtung, wobei dies entsprechend für beide Seiten der querenden Straße gilt.



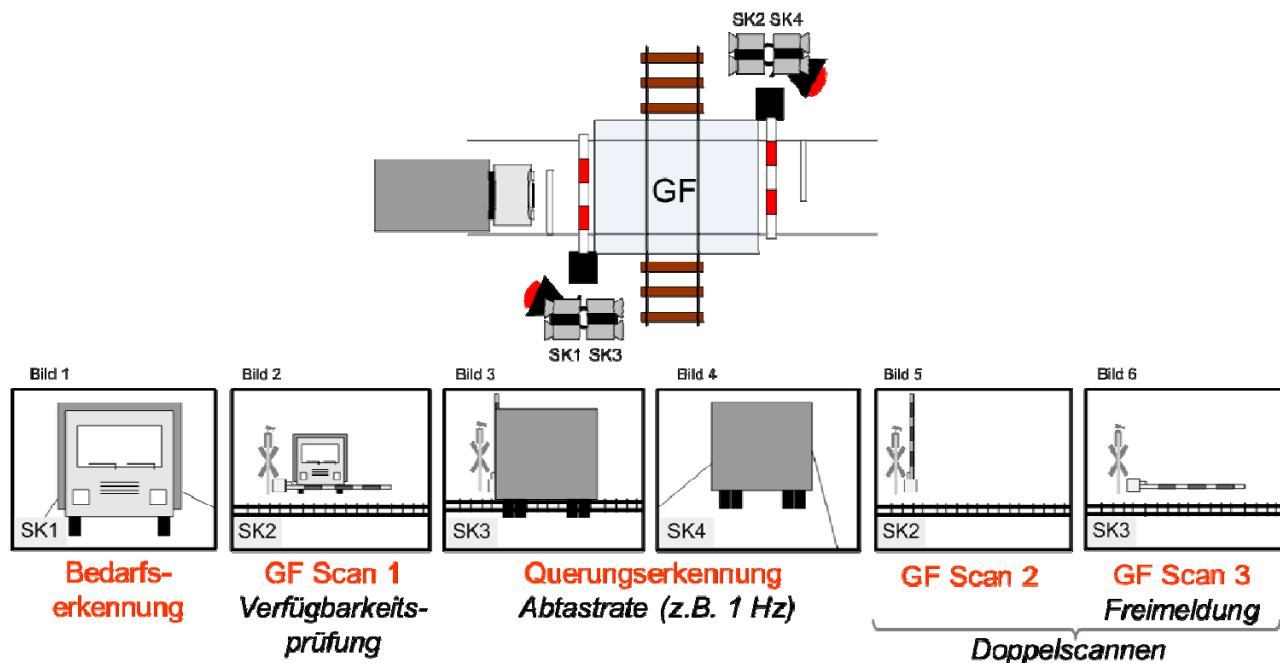
**Abbildung 5-20: Sequenz des Januskopfalgorithmus**

### Die Funktionsweise der Gefahrenraumüberwachung mit der Stereo-Kamera-GFR

Für die sichere Gefahrenraumüberwachung ist der Januskopfalgorithmus die Voraussetzung. Dabei werden 3D-Objekte erkannt, die sich noch zwischen den geschlossenen Schranken befinden könnten. Die Stereo-Kamera-GFR nutzt neben der 3D-Objekterkennung die Differenzbild-Analyse um Hindernisse zu detektieren. Die Bilder 2, 5 und 6 des Januskopfalgorithmus bilden hierfür die Basis. Der Gefahrenraum (GF) wird vor dem Öffnen der Schranken (Bild 2 „GF Scan 1“), vor dem Schließen (Bild 5 „GF Scan 2“) und bei geschlossener Schranke (Bild 6 „GF Scan 3“) gescannt. Die Bilder „GF Scan 2“ und „GF Scan 3“ müssen dieselben Bildinformationen wie „GF Scan 1“ liefern. Bei Abweichungen wird der Gefahrenraum als nicht frei gemeldet. Da sich in der kurzen Zeit einer Querung die Umgebungsbedingungen (Lichtverhältnisse etc.) nicht wesentlich verändern, sind die Bedingungen für die Umsetzung des Ansatzes „Stereo-Kamera-GFR“ günstig. Sind die Bilder identisch bzw. ist kein 3D-Objekt erkannt, wird davon ausgegangen, dass sich kein Hindernis zwischen den Schranken befindet.

Ein zu verwendendes Bildverarbeitungsprogramm hat den Januskopfalgorithmus zum Bildvergleich mittels Differenzbild-Analyse zu nutzen. Das bedeutet, dass in definierten Zeitabständen Bilder von den entsprechenden Sensoren aufgenommen werden. Anhand eines Vergleichs der Bilder die nacheinander aufgenommen wurden ( $t_n$  im Vergleich mit  $t_{n+1}$ ) erkennt das Bildverarbeitungsprogramm, ob der Bereich im Sichtfeld der Kamera unverändert geblieben ist. Hierfür werden die Bilder entsprechend der Sektoreneinteilung im Verarbeitungsprogramm differenziert ausgewertet.

Zur Erläuterung einer Gefahrenraumüberwachung mit dem Stereo-Kamera-System ist in Abbildung 5-21 eine vollständige Sequenz dargestellt und daran anschließend beschrieben.



**Abbildung 5-21: Prinzipskizze der Gefahrenraumüberwachung mit Stereo-Kamera-GFR**

1. Vergleich von Bild 1 zu einem Zeitpunkt  $t_n$  mit einem Bild 1 vom Zeitpunkt  $t_{n+1}$ , wobei der zeitliche Abstand bei ca. einer Minute liegt (kann je nach Anforderung variieren).  
Bemerkung: Dadurch wird ein niedriger Duty Cycle mit einem geringen Energieverbrauch realisierbar.

2. Wiederholen dieses Vorgangs bis ein Unterschied im Bild erkennbar ist. Ein Bild-Unterschied tritt dann ein, wenn ein Fahrzeug durch SK1 detektiert wurde.
3. Ist ein Bild-Unterschied zum Zeitpunkt  $t_{n+1}$  aufgetreten, verkürzt sich die zeitliche Abfolge auf z.B. 5 Sekunden. Ist zum Zeitpunkt  $t_{n+2}$  (also nach weiteren 5 Sekunden) ein 3D-Objekt unverändert erkennbar, dann erfolgt die Anforderung zum Öffnen der Schranken und damit der Januskopfalgorithmus.
4. GF-Scan 1: Ist ein Straßenverkehrsteilnehmer (StVTn) erkannt, dann erfolgt die Aufnahme von Bild 2, wobei der Sektor 3 ausgewertet wird. Dieses Bild wird für einen späteren Vergleich mit Bild 5 benötigt.
5. Nach der Aufnahme von Bild 2 wird bei SK3 die Erwartung ausgelöst, dass ein Straßenverkehrsteilnehmer in den Sektor 3 fährt, die Aufnahme von Bild 3 folgt.
6. Die Schranken öffnen nach Aufnahme von Bild 2. Sobald der StVTn in Sektor 3 durch SK3 detektiert wurde, wird das Bild 3 aufgenommen und für den Vergleich mit Bild 4 zwischengespeichert.
7. Wenn durch SK4 ein 3D-Objekt detektiert wird (nachdem die Schranken geöffnet wurden), erfolgt die Aufnahme des Bildes 4. Die Bildauswertung erwartet ein vergleichbares Objekt, wie es in Bild 3 aufgenommen wurde. Sind die belegten Pixel von Bild 3 und Bild 4 vergleichbar, ist die Querung durch den StVTn erkannt worden. Mit dem Vergleich von Bild 3 mit Bild 4 ist die Funktion Rückstauerkennung umgesetzt.
8. GF-Scan 2: Nach erfolgter Querung wird ein Bild des GF aufgenommen (Bild 5) und mit Bild 2 verglichen. Wird bei der Differenzbild-Analyse kein Unterschied festgestellt, befindet sich kein 3D-Objekt im Bild 5. Die Informationen werden an die BÜ-Steuerung übermittelt. Ist der Gefahrenraum frei, werden die Schranken geschlossen.
9. GF-Scan 3: Bevor der Bahnübergang für den Schienenverkehr freigegeben werden kann, erfolgt die Aufnahme von Bild 6 und die Auswertung hinsichtlich eingeschlossener Objekte. Ist kein 3D-Objekt erkennbar, werden die Lichtzeichen ausgeschaltet und die Freimeldung erfolgt. Die Züge können den Bahnübergang passieren.

#### Die Funktionsweise der Stereo-Kamera-GFR bei abweichenden Randbedingungen

Neben dem Regelbetrieb einer straßenseitigen Querung und dem einwandfreien Funktionieren des Systems, können abweichende Betriebshandlungen erforderlich werden. Nachfolgend wird dargestellt, wie das System auf entsprechende Situationen zu reagieren hat.

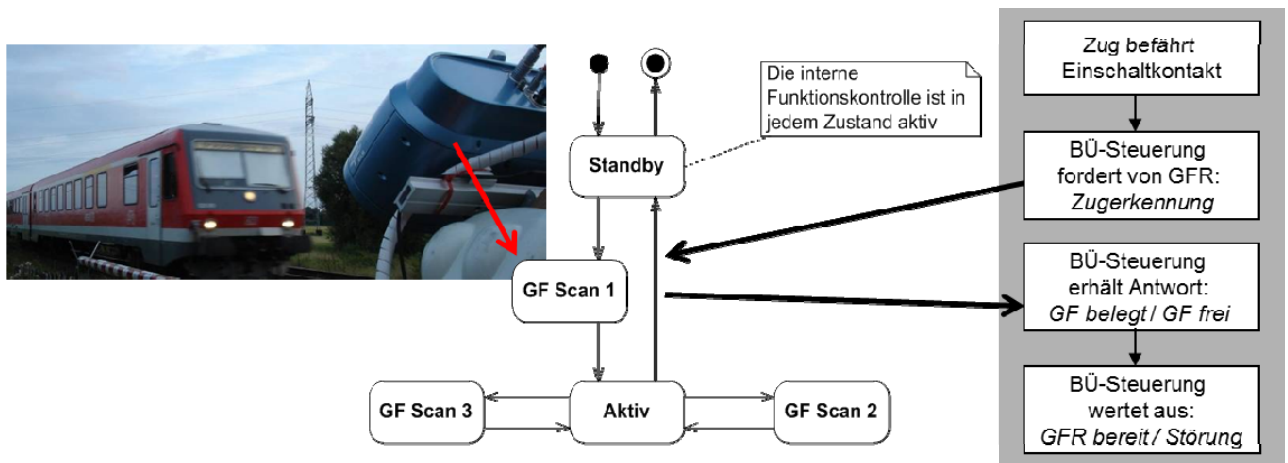
- Bei mehreren StVTn aus beiden Richtungen reagiert das System zeitgesteuert, d.h. nach einer bestimmten Öffnungszeit werden die Lz angeschaltet und Sektor 3 und Sektor 2 hinsichtlich Hindernisse gescannt. Dann werden die Schranken gesenkt und Sektor 3 erneut gescannt und die Freimeldung des GF erfolgt. Besteht dann ein weiterer Öffnungswunsch zuvor am Queren gehinderter StVTn, wird die Öffnung erneut eingeleitet. Dadurch wird verhindert, dass die Schranken zu lange geöffnet sind und der Zugverkehr behindert wird.
- Ist aufgrund starker Verkehrsbelastungen auf einer parallel zur Bahnlinie verlaufenden Hauptstraße ein Abbiegen auf diese nicht möglich, kann sich ein Rückstau auf den Bahnübergang bilden. Das führt dazu, dass je nach Fahrzeuglänge und Anzahl

der Fahrzeuge, diese im Sektor 2 oder 3 zum Halten kommen. Solange diese Sektoren nicht frei von 3D-Objekten sind, erfolgt keine Freimeldung. Da dieser Fall im betrachteten Anwendungsbereich kaum nennenswert oft vorkommen dürfte, ist von einer häufigen Behinderung des Schienenverkehrs nicht auszugehen. Darüber hinaus bietet diese Rückstauerkennung die Möglichkeit, Bahnübergänge zu sichern, die bisher nur nichttechnisch gesichert werden konnten.

#### Besondere Eigenschaften der Stereo-Kamera-GFR

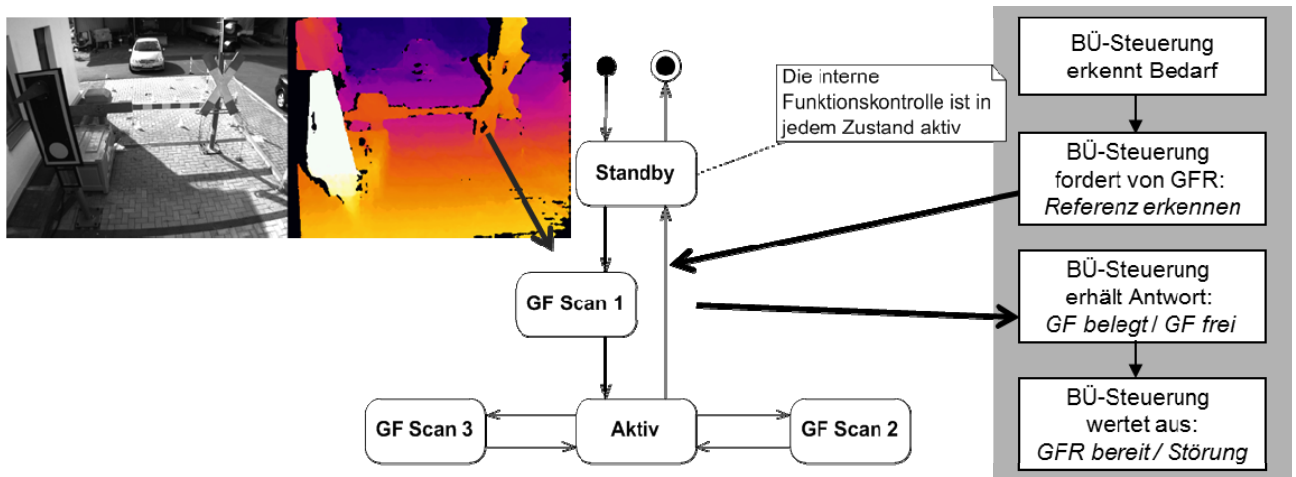
Die spezifischen Eigenschaften einer Stereo-Kamera dienen der erfolgreichen Umsetzung des beschriebenen Januskopfalgorithmus. Doch gerade wegen dieser Technologie müssen besondere Anforderungen an diesen gestellt werden, die nachfolgend genannt und entsprechend der Umsetzung im Sicherungskonzept erläutert werden:

- **Doppelscannen:** Das Doppelscannen (vgl. Abbildung 5-21) ist mit dem Stereo-Kamera-System besser als mit der Radar-GFR umsetzbar. Das für Doppelscannen erforderliche Vorschannen „GF Scan 2“ kann mit der Stereo-Kamera differenziert nur auf Fahrzeuge ausgerichtet sein und erst bei „GF Scan 3“, wenn die Schranken bereits geschlossen sind, nach Allem scannen. Dies ist dann vorteilhaft, wenn beispielsweise Fußgänger noch während des Vorschannens, bei eingeschaltetem Rot aber geöffneter Schranke, den Querungsvorgang beginnen. Die Radar-GFR detektiert in diesem Fall jedes Hindernis und lässt dementsprechend nicht zu, dass die Schranken gesenkt werden (vgl. [Wes10]).
- **Kalibrierung und Re-Kalibrierung:** Die Sensoren müssen zur inneren und äußeren Orientierung kalibriert und diese Einstellung regelmäßig überprüft werden, da sonst die Gefahr besteht, dass die Bildauswertung nicht korrekt funktioniert.
- **Überprüfen der Verfügbarkeit im Regelbetrieb:**
  - Die Überprüfung der Verfügbarkeit und Funktionsfähigkeit der Kernfunktion Gefahrenraumüberwachung ist bei jeder Zugfahrt möglich. Hierzu wird mittels der Grundfunktion Gefahrenraumüberwachung bei jeder Zugfahrt die Zugdurchfahrt zu erkennen sein. Bei Befahren der Einschaltetelemente durch den Zug werden die Sensoren SK2 und SK3 aktiviert. Wenn der Zug den Gefahrenraum befährt, müssen beide Sensoren ein Hindernis (hier: den Zug) erkennen und melden (vgl. Abbildung 5-22 [Foto: Autor]). Wenn die letzte Achse des Zuges das Ausschaltetelement befahren hat, müssen SK2 und SK3 den Gefahrenraum als „frei“ detektieren können. Trifft eine der beiden Bedingungen nicht zu, ist von einer Belegung des Gefahrenraums auszugehen. Bei ausbleibender Zugererkennung wird eine Fehlermeldung generiert und die betrieblichen Rückfallebenen wirken.



**Abbildung 5-22: Überprüfung der Funktionsfähigkeit des Stereo-Kamera-Systems**

- Das Stereo-Kamera-System muss für die Überprüfung der Verfügbarkeit die Referenz auf der gegenüberliegenden Seite erkennen. Dieser Prozess wird vor jedem Öffnungsvorgang eingeleitet. Wenn dies nicht möglich ist, wird die GFR als gestört betrachtet (siehe Abbildung 5-23).



**Abbildung 5-23: Überprüfung der Funktionsfähigkeit des Stereo-Kamera-Systems**

- Vermeidung von Fehlinterpretationen: Durch den Einsatz von SK können Fehlinterpretationen durch Lichtkegel, Schattenschlag und schnellem Hell-dunkel-Wechsel ausgeschlossen werden. Fehlinterpretation eines Öffnungswunsches (Objekterkennung in Sektor 1) können z.B. durch Tiere oder Menschen, die nicht queren wollen, hervorgerufen werden. Zur Vermeidung fehlerhaft hervorgerufener Bedarfserkennungen wird differenzierend ausgewertet. Dadurch kann das System so eingestellt werden, dass beispielsweise vor den Schranken nur Straßenfahrzeuge detektiert werden und „kleine“ Objekte (beispielsweise Fußgänger und Radfahrer) ihren Öffnungswunsch per ortsfesten Taster angeben. Im Gefahrenraum wird jedes 3D-Objekt identifiziert, so dass hier auch Menschen erkannt werden können. Dadurch unterscheidet sich dieser Ansatz wesentlich von der bisher im Einsatz befindlichen Radar-GFR, die Hindernisse nicht differenziert ermitteln kann.
- Rückfallebene: Bei Fehlverhalten oder Versagen des optischen Systems, wenn Schranken offen / geschlossen sind, kann der Tf über HET bzw. Automatik-HET die

Sicherung einleiten. Im Falle des Nichtfreiseins des GF ist dem Tf das Signal BÜ0 anzuzeigen, was dazu führt, dass der Zug vor dem Bahnübergang anhält. Eine Sicherung des Gefahrenraums und entsprechende Freimeldung erfolgt dann durch den Tf.

- Redundanz: Weiterhin vorteilhaft ist die Nutzung beider auf den Gefahrenraum ausgerichteten Stereo-Kameras (SK2 und SK3) als GFR. Hierfür müssen vor dem Öffnen Referenzbilder aufgenommen und mit den Bildern vor und nach dem Schließen verglichen werden. Sobald durch eines der beiden Bildpaare ein Bildunterschied festzustellen ist, wird der Gefahrenraum nicht als frei gemeldet. Dadurch kann ein redundantes System bereitgestellt werden, da zwei voneinander unabhängige Sensorpaare ein und dasselbe Ergebnis liefern müssen.
- Funktionssicherheit bei erschwerten Witterungsbedingungen: Die Stereo-Kamera-GFR ermöglicht auch bei verschneitem Bahnübergang den durch den Schnee verursachten kürzeren Abstand zwischen Sensor und Untergrund auszugleichen, da das Bild 2 direkt vor dem Öffnen der Schranken als Vergleichsgröße genutzt wird. Sind durch sehr dichten Nebel, plötzlichem Übergang von hellen zu dunklen Umgebungsbedingungen, Schneefall, Regen oder Reflexionen, beispielsweise durch Gewässer hervorgerufen, die Sichtverhältnisse des Systems eingeschränkt, wird ein Funktionsversagen unterstellt, und die Schranken werden nicht geöffnet. Zum Zweck der Überprüfung von den umgebenden Sichtverhältnissen müssen die Stereo-Kameras das jeweils auf dem anderen Straßenabschnitt befindliche Andreaskreuz detektieren können. Demzufolge dient das markant geformte Andreaskreuz als Referenzobjekt zur Überprüfung der Anlagenverfügbarkeit.

### 5.3.2 Logik der BÜ-Sicherung

In diesem Abschnitt werden die elementaren Betriebsvorgänge zur Sicherung der Bahnübergänge von der Straßen- und der Schienenseite dargestellt.

#### **Straßenseitiger Sicherungsprozess**

Der straßenseitige Prozess des Gesamtsystems startet, wenn ein StVTn den Querungsbedarf über den Taster mitteilt oder durch das optische System automatisch erkannt wird. Die Lichtzeichen (Lz) werden dann eingeschaltet und zeigen so dem StVTn, dass die BÜSA eingeschaltet ist, und er erkannt wurde. Solange kein Querungsbedarf besteht, sind die Lz ausgeschaltet und die Schranken geschlossen – die Anlage ist ausgeschaltet. Das spart Energie, erhöht die Lebensdauer und verringert den Wartungsaufwand. Die Sequenz eines Querungsvorgangs bei voller Funktionsfähigkeit ist wie folgt gestaffelt:

- Der StVTn nähert sich dem Bahnübergang (BÜ) und bleibt im Sektor 1 stehen.
- Das optische System bzw. der Taster detektiert den StVTn.
- Die Lz werden angeschaltet (3 Sekunden gelb, dann rot [SVO01]).
- Sollte zum Zeitpunkt der Anforderung ein Zug den Funkanrückmelder oder das Einschaltelement der BÜSA befahren haben, bleibt das Lz auf rot geschaltet und die Schrankenanlage bis zur Befahrung des Ausschaltelements verschlossen.

- Die Schrankenanlage öffnet bei freier Strecke nach dem zuvor durchgeführten GF Scan 1. Anschließend werden die Lz ausgeschaltet.
- Das optische System detektiert, dass ein StVTn den BÜ befahren und geräumt hat (sollten weitere StVTn den BÜ befahren haben, wird ein Bildunterschied festgestellt und der BÜ wird als nicht geräumt detektiert).
- Die Lz werden angeschaltet (z.B. kann dies zeitabhängig oder nur bei freiem Gefahrenraum beginnen).
- Damit bei geöffneter Schrankenanlage ein nachgefahrener oder von der Gegenseite den BÜ befahrender oder begehender StVTn nicht unentdeckt bleibt, überwacht die Sensorik die ordnungsgemäße Räumung des BÜ. Dabei werden entsprechend einer zu projektierenden Taktrate die Sektoren 2 und 3 gescannt.
- Das optische System detektiert vor dem Schrankenschließen den GF (GF Scan 2) und stellt keine nachfahrenden/-gehenden StVTn fest.
- Die Schrankenanlage schließt.
- Das optische System überprüft den GF ein weiteres Mal (GF Scan 3). Ist der GF frei, erfolgt die Freimeldung.
- Die Lz erlöschen, die BÜSA ist ausgeschaltet und befindet sich in Grundstellung.

Eine ausführliche Übersicht dieses Prozesses ist in Abbildung 5-24 dargestellt.

### **Schienenseitiger Sicherungsprozess**

Der Zug befährt den Funkanrückmelder und sperrt damit die straßenseitige Querung (Nicht-Öffnen-Kriterium). Somit können die Schranken nicht mehr geöffnet werden bis der Zug das Ausschaltelement befahren hat. Das Überwachungssignal steht in Grundstellung auf BÜ0. Befährt ein Zug das Einschaltelement, so wird unterschieden, ob der BÜ zu diesem Zeitpunkt gesichert ist oder nicht gesichert werden konnte. Ist der BÜ nicht gesichert, muss dieser zunächst gesichert werden. Dies geschieht unter Berücksichtigung der Vorlaufzeit. Anschließend erhält auch in diesem Fall die BÜ-Steuerung eine Öffnungssperre durch die optiBÜSA-Logik. Damit kann das Überwachungssignal auf BÜ1 gestellt werden. Nachdem der Zug den BÜ überquert und das Ausschaltelement befahren hat, wird das Überwachungssignal wieder auf BÜ0 gestellt und die Öffnungssperre zurückgenommen.

Der Ablauf, wenn ein Zug den BÜ mit optiBÜSA passiert, ist in Abbildung 5-25 dargestellt.



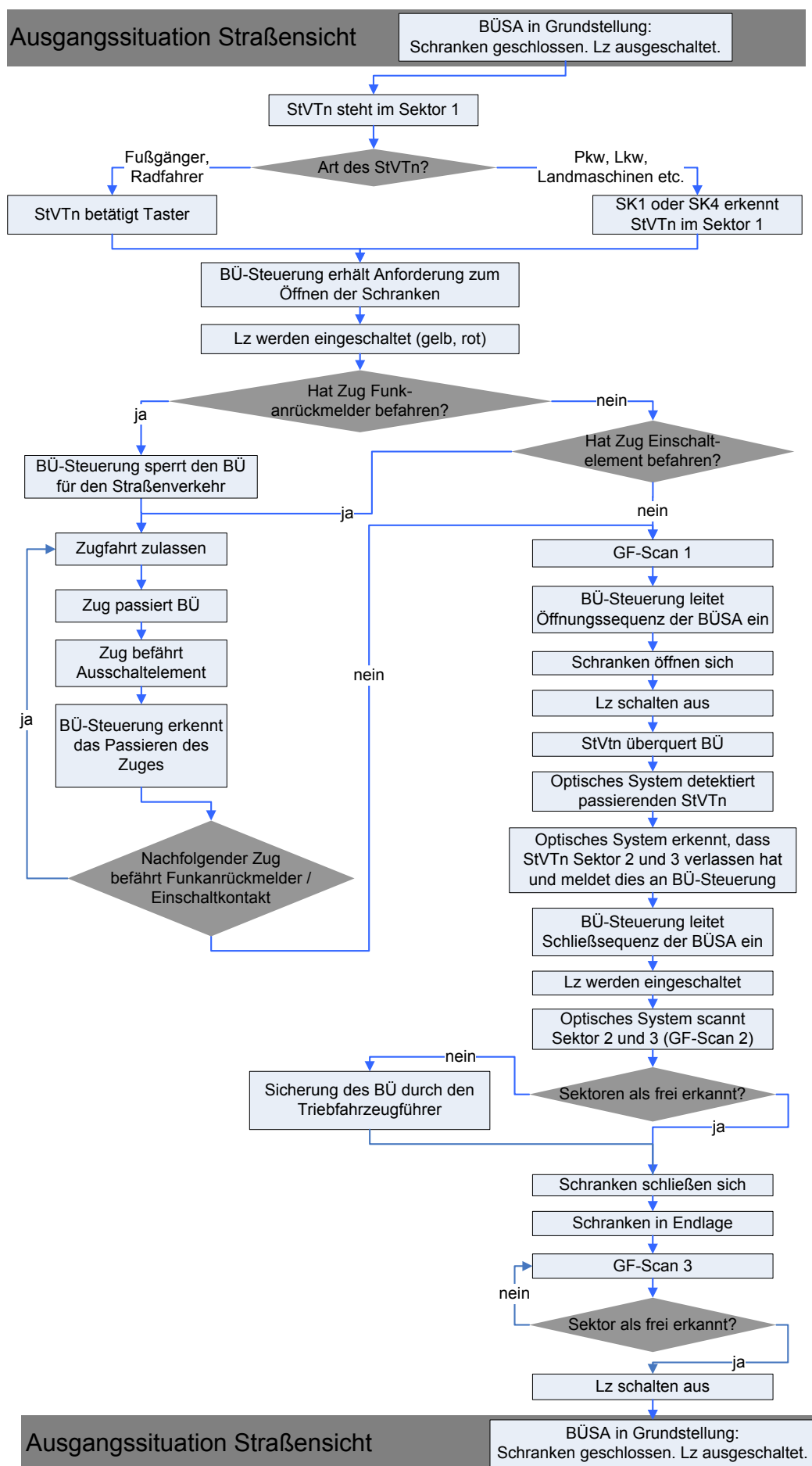


Abbildung 5-24: Prozessablauf optiBÜSA aus Straßensicht

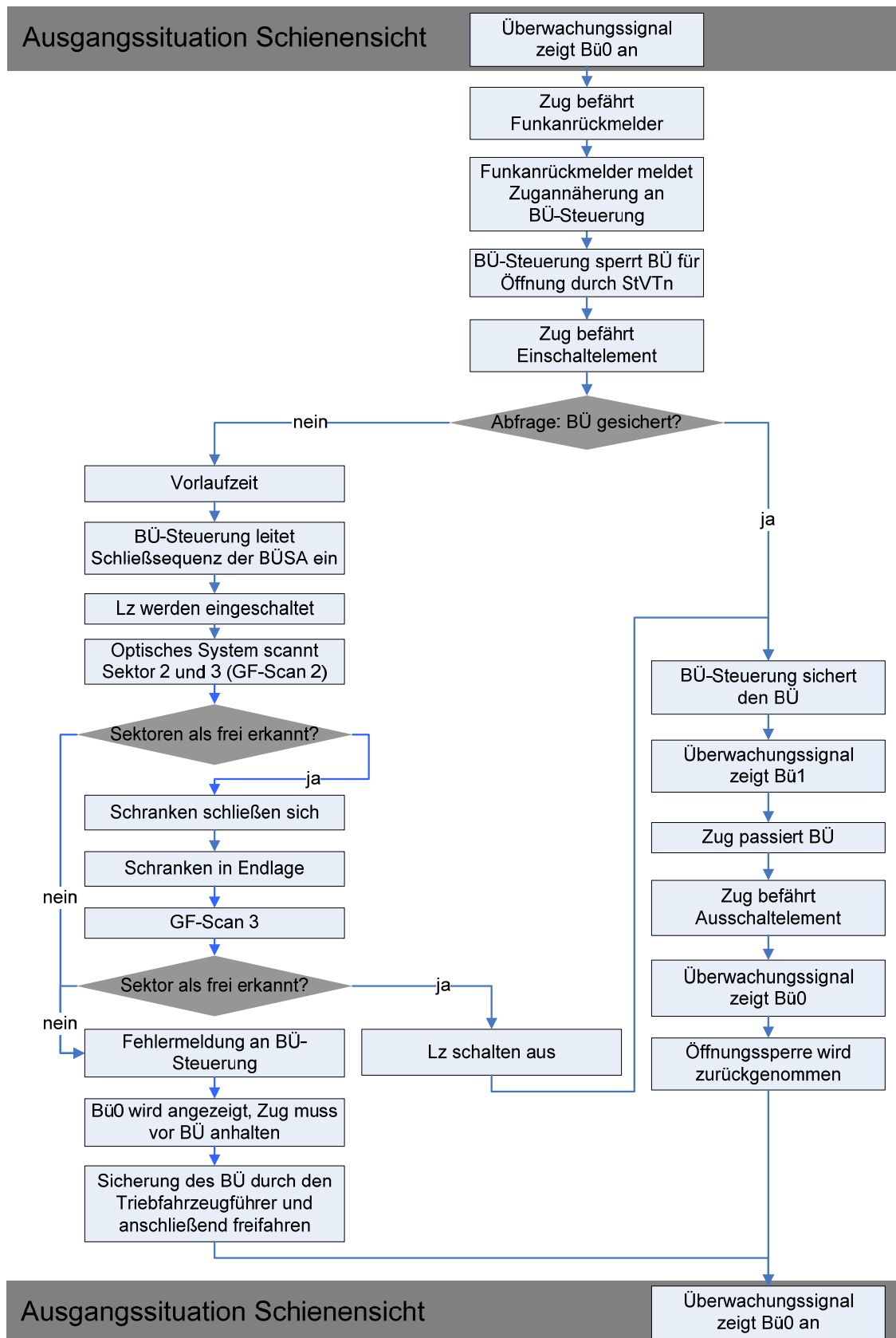


Abbildung 5-25: Prozessablauf optiBÜSA aus Schienensicht

### 5.3.3 Funktionsweise in der Rückfallebene

Die Gewährleistung der Sicherheit eines BÜ mit optiBÜSA erfolgt entsprechend des zuvor beschriebenen Vorgehens. Dies bedeutet, dass bei einem Defekt oder einer Störung an der Bahnübergangssicherungstechnik (z.B. Schrankenanlage, Lichtzeichen, Einschaltelement) die Schranken in ihrer Grundstellung geschlossen bleiben und eine Störungsmeldung per Diagnoseschnittstelle weitergeleitet wird. Kommt es zu einem Ausfall des versorgenden Energienetzes, werden durch die Notstromversorgung das Schließen der Schranken und das Sichern des BÜ eingeleitet und die BÜSA ausgeschaltet. Wird in diesem Zeitraum eine Öffnung angefordert, wird dem nicht nachgekommen.

Das Systemkonzept optiBÜSA bietet für das Versagen der Stereo-Kamera-Technologie entsprechende Rückfallebenen. Diese sind zwar mitunter als betrieblich hemmend aber nicht als potenziell gefährdend einzustufen. Der Versagensfall beschreibt den Defekt oder die Störung im Gesamtsystem. Das Verhalten des Systems wird erläutert und anschließend bewertet. Da die mit optiBÜSA ausgerüsteten Bahnübergänge an Straßen mit sehr geringer Kritikalität zu finden sein werden, sind für die seltenen Fälle des Systemversagens die betrieblich hemmenden Situationen als sehr selten einzustufen und der Einsatz von optiBÜSA entsprechend positiv zu bewerten.

Die erstmals beschriebene Anwendung einer Stereo-Kamera-GFR erfordert weitergehende Betrachtungen hinsichtlich des Verhaltens des Gesamtsystems, wie dies in Tabelle 5-3 dargestellt wird.

Grundfunktion	Versagensfall	Funktionsweise des Systems	Bewertung	Element
Bedarfs-erkennung	Eine (oder beide) Stereo-Kamera im Sektor 1 ist defekt, alle weiteren Komponenten von optiBÜSA sind nach wie vor funktionsfähig.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ausgabe Fehlermeldung</li> <li>- Der Straßenbenutzer kann seinen Bedarf manuell anmelden.</li> <li>- Die Bedienung ähnelt der Wechselsprechanlage bei einer Anrufschrake, mit dem Unterschied, dass es keine Sprechverbindungsmöglichkeit zu einem Bediener gibt.</li> </ul>	Betrieblich nicht hinderlich und nicht gefährlich.	Taster
Rückstau-erkennung	Eine (oder beide) Stereo-Kamera Sektor 1 ist defekt, alle weiteren Komponenten von optiBÜSA sind nach wie vor funktionsfähig.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ausgabe Fehlermeldung</li> <li>- Der Rückstau in den Gefahrenraum wird durch die Sensoren im Sektor 3 erkannt.</li> <li>- Der Rückstau unterhalb der Schranken im Sektor 2 wird nicht erkannt.</li> <li>- Befindet sich ein StVtN unterhalb der Schranken, wird diese die Endlage nicht erreichen und der BÜ kann nicht gesichert werden und wird entsprechend den Zug vor dem BÜ zum halten bringen.</li> </ul>	Betrieblich hinderlich und nicht gefährlich	Stereo-Kameras des Sektors 3 Schranken
Gefahrenraum-überwachung	Schraken geöffnet, Funktion „GF Scan“ nicht durchführbar	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ausgabe Fehlermeldung</li> <li>- Da in diesem Fall keine Freimeldung des Gefahrenraums erfolgen kann, bleiben die Schranken geöffnet und das Signal BÜ0 fordert den nächsten Zug auf, vor dem Bahnübergang anzuhalten.</li> <li>- Vergewissern des Freiseins des Gefahrenraum durch den Triebfahrzeugführer.</li> <li>- Die Schließung der Schranken wird durch den Triebfahrzeugführer mit HET bzw. Automatik-HET angestoßen.</li> </ul>	Betrieblich hinderlich, nicht gefährlich.	HET/ Automatik-HET

Grundfunktion	Versagensfall	Funktionsweise des Systems	Bewertung	Element
Gefahrenraumüberwachung	Schranken geschlossen, Funktion „GF Scan“ nicht durchführbar	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ausgabe Fehlermeldung</li> <li>- Schranken öffnen, wenn Strecke es zulässt</li> <li>- Da keine Freimeldung des Gefahrenraums erfolgen kann, bleiben die Schranken geöffnet und das Signal Bü0 fordert den nächsten Zug auf, vor dem Bahnübergang anzuhalten.</li> <li>- Vergewissern des Freiseins des Gefahrenraums durch den Triebfahrzeugführer.</li> <li>- Die Schließung der Schranken wird durch den Triebfahrzeugführer mit HET bzw. Automatik-HET angestoßen.</li> </ul>	<p>Betrieblich hinderlich, nicht gefährlich.</p> <p>Dies ist insofern auch für den Querungsbedarf von Rettungseinheiten (Krankenwagen, Feuerwehr oder Polizei) im Fall des Defektes der GFR sinnvoll, da so immer ein Queren möglich ist.</p>	HET/ Automatik-HET
Gefahrenraumüberwachung	Ausfall einer Stereo-Kamera der beiden Systeme im Sektor 3	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ausgabe Fehlermeldung</li> <li>- Funktion „GF Scan“ bleibt mit einer Stereo-Kamera durchführbar</li> </ul>	<p>Redundantes Systemdesign für die Hinderniserkennung im Gefahrenraum</p> <p>Betrieblich nicht hinderlich, nicht gefährlich</p>	1 von 2 Stereo-Kamera
Gefahrenraumüberwachung	Ausfall beider Stereo-Kamera-Systeme im Sektor 3	Funktion „GF Scan“ nicht durchführbar, daher Verhalten wie bei Versagensfall: Schranken geschlossen, Funktion „GF Scan“ nicht durchführbar	Betrieblich hinderlich, nicht gefährlich	HET/ Automatik-HET
Gefahrenraumüberwachung	Gefahrenraum wird nicht freigemeldet	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ausgabe Fehlermeldung</li> <li>- Da keine Freimeldung des Gefahrenraums erfolgen kann, bleiben die Schranken geöffnet und das Signal Bü0 fordert den nächsten Zug auf, vor dem Bahnübergang anzuhalten.</li> <li>- Vergewissern des Freiseins des Gefahrenraums durch den Triebfahrzeugführer.</li> <li>- Die Schließung der Schranken wird durch den Triebfahrzeugführer mit HET bzw. Automatik-HET angestoßen.</li> </ul>	Betrieblich hinderlich, nicht gefährlich.	HET/ Automatik-HET
Gefahrenraumüberwachung	Andreaskreuz der Gegenseite wird von beiden Stereo-Kameras im Sektor 3 nicht erkannt (z.B. aufgrund von Nebel)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ausgabe Fehlermeldung</li> <li>- Kein sicheres Funktionieren von „GF Scan“ möglich</li> <li>- Bei Anbindung an eine Leitstelle: Live-Bild-Übertragung zur Leitstelle und Freimeldung durch Fahrdienstleiter.</li> <li>- Bei geöffneten Schranken, Reaktion wie bei: „Schranken geschlossen, Funktion „GF Scan“ nicht durchführbar“</li> </ul>	Betrieblich hinderlich, nicht gefährlich.	z.B. Live-Bild auf Leitstelle (mit CMOS möglich)

Tabelle 5-3: Verhalten von optiBÜSA in der Rückfallebene

## 5.4 Weitere Einsatzbereiche für die optiBÜSA-Technologie

Die abgängige Alttechnik Anrufschanke bietet ein ideales Migrationsumfeld für innovative Technologien, da ein gestufter Aufbau der Sicherungsfunktionen genutzt werden kann, um die Bahntauglichkeit dieser Innovationen unter Beweis zu stellen. Diese Arbeit legt mit der Lösung für bedarfsgesteuerte Schranken auf Basis eines Stereo-Kamera-Systems den Grundstein für die Anwendung optischer Systeme für sicherheitskritische und nicht-sicherheitskritische Anwendungen im Eisenbahnsystem.

Ein wesentlicher Nutzen des vorgestellten Ansatzes liegt in der Breite, der durch ein einzelnes Stereo-Kamera-System realisierbaren Funktionen an einem Bahnübergang, der mit optiBÜSA ausgerüstet wird.

Die Technologie ist darüber hinaus für andere Bereiche im System Bahn prinzipiell einsetzbar. Im Folgenden aufgeführte Funktionen (siehe Tabelle 5-4) könnten für andere Anwendungen im Bahnbereich weiterentwickelt werden.

Funktion	Beschreibung
Bedarfsgesteuerte Schranke (automatisiert)	Ersatz der Alttechnik Anrufschranks mit geringeren LCC dank Personaleinsparungen  Geringere LCC gegenüber bisherigen Ablösestrategien der Anrufschranks durch Verzicht auf umfangreiche Straßenbaumaßnahmen  Weltweit existieren bedarfsgesteuerte Bahnübergangssicherungskonzepte. Für diese Konzepte ist optiBÜSA ebenfalls einsetzbar und muss somit als Ablösekonzept für bedarfsgesteuerte Schranken und nicht nur für die Anrufschranks gelten.
Stereo-Kamera-GFR für bedarfsgesteuerte Schranken	Der Entwurf einer wirtschaftlichen Stereo-Kamera-GFR speziell für bedarfsgesteuerte Schranken erhöht die Sicherheit bisheriger Anrufschranks bei gleichzeitig konkurrenzfähigen LCC der BÜSA.
Stereo-Kamera-GFR	Der Entwurf einer wirtschaftlichen Stereo-Kamera-GFR verbessert die LCC der BÜSA, die bisher mit einer Radar-GFR ausgerüstet werden müssen. Mit einer wirtschaftlichen GFR könnten mehr Bahnübergänge gegenüber dem heutigen Ausrüstungsgrad ausgestattet und dadurch Unfälle reduziert werden. Dieses System bietet eine Alternative zur bisher einzigen GFR-Technologie.
Rückstaudetektor	Ein innovativer Ansatz ist die Rückstauerkennung zur bedarfsgerechten Ansteuerung von vorgeschalteten Lichtzeichen. Durch diese Funktion können bei BÜSA vorgeschaltete Lichtzeichen abhängig vom Bedarf seitens des Straßenverkehrs angesteuert werden. Dadurch ist die Optimierung der Schließzeiten möglich, da nur bei Rückstaugefahr auf den Bahnübergang die vorgeschalteten Lichtzeichen angesteuert werden müssen, die den Straßenverkehr anhalten der nicht über den Bahnübergang fährt.
Saisonbetrieb	Durch das optische System kann eine GFR umgesetzt werden die es prinzipiell möglich macht, bei Schrankenanlagen (die nicht bedarfsgesteuert arbeiten) zum Einsatz gebracht zu werden. Ist der BÜ straßenseitig saisonal unterschiedlich stark frequentiert, so dass z.B. im Sommer das häufige Queren des BÜ eine Funktionsweise nach dem Anrufschranksprinzip nicht rechtfertigt, kann mit dem automatisierten System optiBÜSA ein anderer Betriebsmodus eingerichtet werden. Damit wäre es umsetzbar, dass im Winter optiBÜSA nach dem Anrufschranksprinzip arbeitet und während des Sommers als Schrankenanlage die bei Zugannäherung den Schließvorgang einleitet.
Ferndiagnose	Die aktuelle Situation am Bahnübergang wird in eine Zentrale per Live-Bild einer Mono-Kamera übertragen, so dass sich ein Stellwerksmitarbeiter bei Störungen der BÜ-Technik oder bei unklaren Meldungen bzgl. des Gefahrenraumes per „Augenschein“ über den Zustand informieren kann. Dies kann auch generell als betriebliche Rückfallebene für die Stereo-Kamera-GFR genutzt werden.
Notfallmanagement	Das Stereo-Kamera-System ermöglicht die zusätzliche Nutzung der Kameratechnologie für Live-Beobachtungen des Bahnübergangs im Fall von Unfällen. Dadurch lassen sich Rettungskräfte und -maßnahmen besser koordinieren.
Zugschlusserkennung	Ebenfalls kann mit diesem System eine innovative Zugschlusserkennung ermöglicht werden. Diese kann bei Bahnübergängen zum Einsatz kommen, die zukünftig mit dem optischen System ausgerüstet sind. Die Zugschlusserkennung ist dem aus [Mro05] bekannten Verfahren angelehnt, mit dem Unterschied, dass eine automatisierte Erkennung möglich ist (vgl. [MPB08]).
„BÜ-Blitzer“	Bei Halbschrankenanlagen kann das optische System zur Detektion von Nummernschildern genutzt werden, um bspw. das Vorbeifahren bei geschlossenen Halbschranken polizeilich zu ahnden.
Rottenwarnung	Neben dem Nutzen für weitere Funktionen am Bahnübergang ist im Zuge der Arbeit festgestellt worden, dass sich das Verfahren des Januskopfalgorithmus analog für den Einsatz zur automatischen Rottenwarnung übertragen lässt [GP08a], [GP08b], [PG09].

Tabelle 5-4: Weitere potentielle Einsatzbereiche des Stereo-Kamera-Systems

## 5.5 Zwischenfazit

Das vorgestellte Konzept optiBÜSA ist ein automatisiertes und bedarfsgesteuertes Bahnübergangssicherungsverfahren, welches das Prinzip der Anrufschranks aufgreift, aber ohne Personaleinsatz auskommt. Die Breite der Fahrbahn entspricht den Anforderungen an BÜ mit Anrufschranks, weshalb keine umfangreichen Änderungen an der Straße nach Rückbau einer Anrufschranks und Installation von optiBÜSA erforderlich wird. Vorteilhaft an optiBÜSA ist die technische Gefahrenraumüberwachung und -freimeldung, eine streckenseitige Überwachung durch den Triebfahrzeugführer, eine automatische Rückstauerkennung zur Vermeidung vorzeitigen Schrankenschließens und die automatisierte Bedarfserkennung. Bei optiBÜSA ist somit kein Eingreifen eines Bedieners notwendig. Die BÜSA kann autark, d.h. von einem Stellwerk unabhängig, betrieben werden. Mit diesen Funktionen können sämtliche Anforderungen zur Automatisierung von Anrufschranks realisiert werden (vgl. Abbildung 5-26).

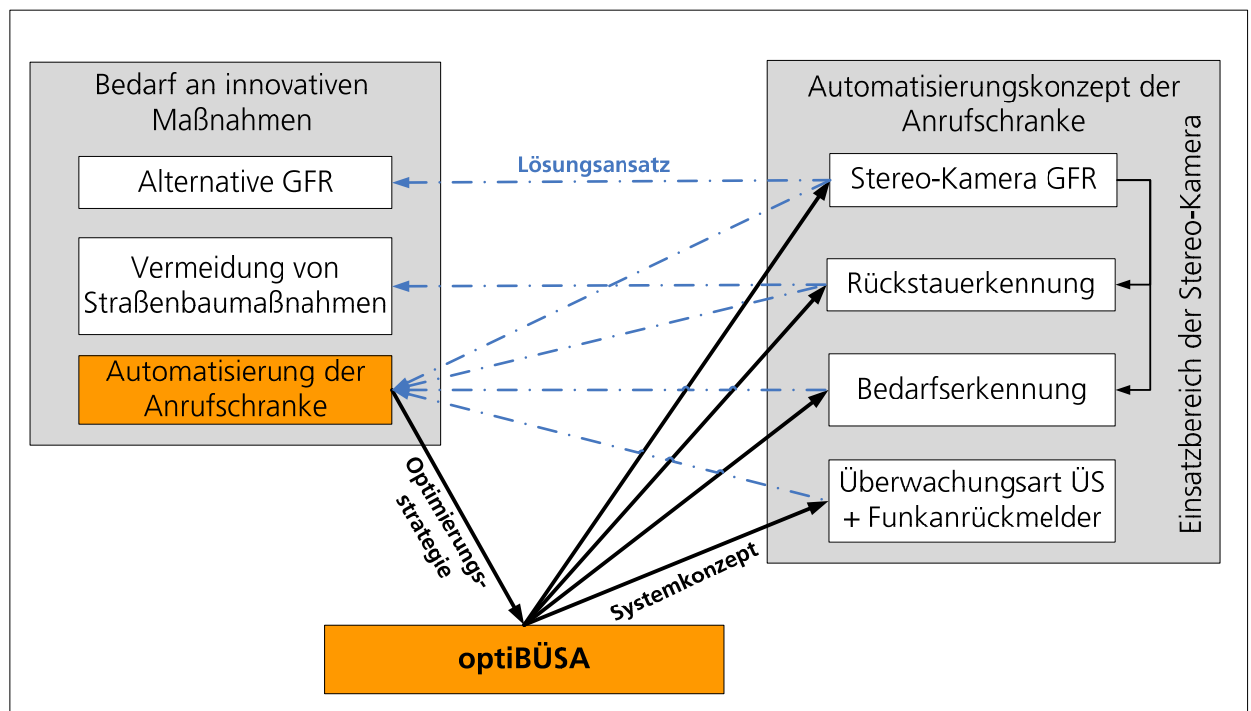


Abbildung 5-26: Überblick zu optiBÜSA

Das Sicherheitsniveau wird im Vergleich zur Anrufschränke durch das optische System erhöht, das mehrere sicherungstechnische Aufgaben in einem Gerät vereint (z.B. Gefahrenraumüberwachung, Rückstauerkennung). Die Rückstauerkennung ist auf andere Sicherungsarten, wie beispielsweise auf Halbschrankenanlagen, übertragbar. Mit dem Einsatz der Rückstauerkennung ist die betriebliche und sicherungstechnische Qualität von optiBÜSA höher als beim Einsatz einer Radar-GFR einzustufen, da auch der Bereich unterhalb der Schranken und die erfolgreiche Querung detektiert wird.

Insgesamt steht bei einer erfolgreichen Systementwicklung folgendes in Aussicht:

- Autarkes und automatisiertes Sicherungsverfahren nach dem Anrufschränkenprinzip.
- Erschließen einer neuen Technologie für den Bahnübergangsbereich wird möglich.

Dem stehen kalkulierbare Risiken gegenüber. Das Risiko der technologischen Entwicklung eines Stereo-Kamera-Systems ist gering, da diese Technologie in anderen Domänen zum Stand der Technik zählt. Das wirtschaftliche Risiko ist aufgrund der verschiedenen Funktionen, die auch einzeln eingesetzt werden können, gering. Das Risiko der Zulassung für den Bahnbetrieb ist hoch, da neue betriebliche Verfahren und Technologien eingesetzt werden, mit denen es im Bahnbetrieb noch keine Erfahrung gibt. Diese Arbeit zeigt eine Migrationsstrategie auf, um für optische Systeme schrittweise die Bahntauglichkeit nachweisen zu können. Dies wird mit der verfahrenssicheren Einbindung in ein sicheres Gesamtsystem angestrebt. Das Risiko, ohne ein optisches System keine Anrufschränkenautomatisierung in die Praxis zu überführen, ist gering, da für die Grundfunktion Gefahrenraumüberwachung eine Radar-GFR genutzt werden kann. Das Problem der automatisierten Bedarfserkennung und Rückstauerkennung ist dann zwar nicht gelöst, kann aber gegebenenfalls durch andere Systeme umgesetzt werden. Hierfür müssen weitere Studien folgen.



## 6 Fallstudie: Bewertung des Systemkonzepts

In den vorangegangenen Kapiteln wurde der Bedarf für eine neue Bahnübergangssicherung aufgezeigt und eine geeignete Optimierung durchgeführt. Im Folgenden wird das neue Konzept optiBÜSA entsprechend der AOB bewertet. Ziel ist es, optiBÜSA hinsichtlich Sicherheit, betrieblicher Eignung und Nutzen zu verifizieren. Damit wird eine nachvollziehbare Grundlage für die strategische Entscheidung geliefert, ob dieses Konzept verworfen oder weiterentwickelt werden soll. Abschließend werden die gewonnenen Erkenntnisse der Systemoptimierung und der Verifikation diskutiert.

### 6.1 Analyse der Systemsicherheit

Entscheidend für die Realisierung der geforderten Funktionen und den Nachweis gleicher Sicherheit im Entwicklungsprozess eisenbahnsicherungstechnischer Systeme ist die Identifikation der Anforderungen und die Bestätigung der korrekten Umsetzung dieser durch eine kritische Betrachtung der Systemsicherheit. Neue Systeme müssen deshalb vor der Einführung mindestens den „Nachweis gleicher Sicherheit“ gemäß EBO erbringen. Zunächst sollten die zum „Stand der Technik“ abweichenden Systembestandteile und Prozesse qualitativ betrachtet werden [KR07]. OptiBÜSA wird deshalb mittels FMEA (vgl. Ausführungen Kapitel 3) dahingehend untersucht, welche Auswirkungen ein Ausbleiben oder eine falsche Ausführung der Aktivierungs- und Überwachungssensorik verursachen. Nachfolgend wird deshalb die Analyse der Sicherheit auf Basis des systematischen Vorgehens einer FMEA für das optische System durchgeführt.

#### Systemarchitektur der Aktivierungs- und Überwachungssensorik

Das Gesamtsystem optiBÜSA besteht aus den Systemen Stromversorgung, Aktivierungs- und Überwachungssensorik, Steuerung, Systemdiagnose und Feldelemente (vgl. Abbildung 6-1).

Diesen werden die Teilsysteme Stromversorgungseinrichtung, Stereo-Kamera-System, Taster, BÜ-Steuerung, Diagnoseeinrichtung, Schranken, Lichtzeichen, Überwachungssignal, Einschalt- und Ausschaltelement untergeordnet. Der Funkanrückmelder ist für die Betrachtung der Systemsicherheit nicht relevant, da er nicht zur Sicherheit des Systems beiträgt. Die Aktivierungs- und Überwachungssensorik Stereo-Kamera-System und Taster meldet selbst eintretende Störungen und übernimmt drei wichtige Funktionen von optiBÜSA (vgl. Abbildung 6-2):

1. Funktion „Bedarf melden“ aus der Grundfunktion Bedarfserkennung
2. Funktion „Rückstau melden“ aus der Grundfunktion Rückstauerkennung
3. Funktion „Zustand Gefahrenraum melden“ aus der Grundfunktion Gefahrenraumüberwachung

Im nächsten Schritt werden Aktionen sowie ein- und ausgehende Informationen aufgelistet. Aktionen sind Funktionen, die Auswirkungen auf die Umwelt, aber keine Auswirkungen auf andere Teilsysteme haben. Ausgehende Informationen sind Funktionen, die das System ver-



lassen und Eingangsinformationen für andere Systeme darstellen. Für jedes System wurden die Aktionen und Informationen beschrieben (vgl. Tabelle 6-1). Das optische System verfügt nach dieser Definition über keine Aktionen.

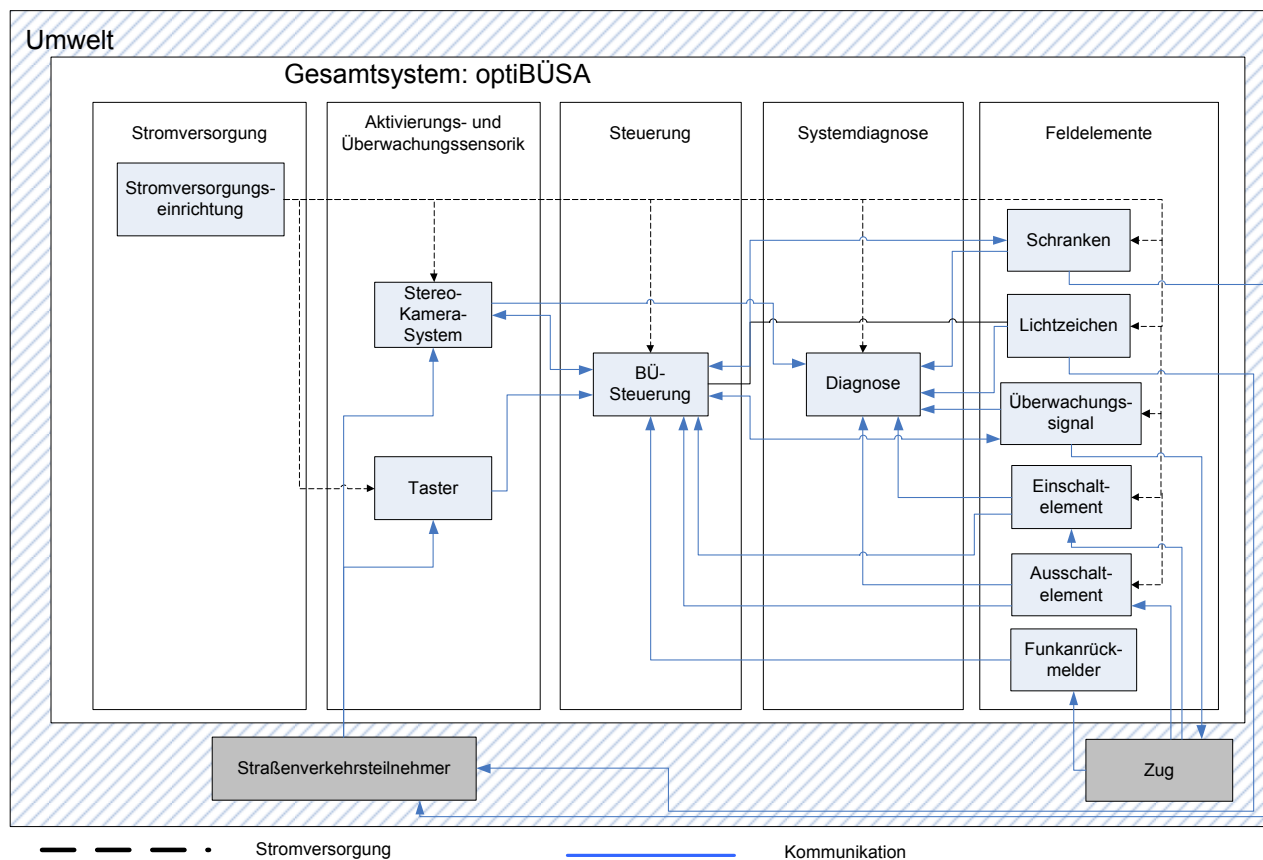


Abbildung 6-1: Systemarchitektur des Gesamtsystems optiBÜSA

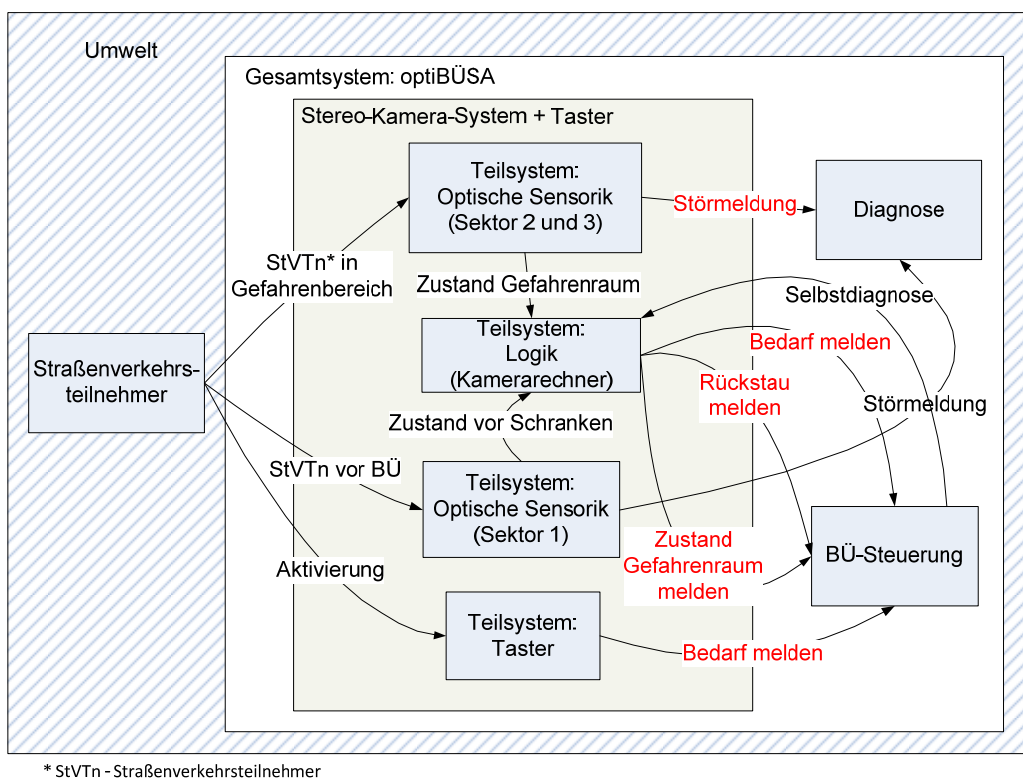


Abbildung 6-2: Systemarchitektur Optisches System und Taster

Information von	Inhalt	Funktion
Straßenverkehrsteilnehmer	StVTn im Gefahrenbereich	3.1
	StVTn vor Bahnübergang	3.2
	Aktivierung Taster	3.3
BÜ-Steuerung	Starte Selbstdiagnose (Zug kommt)	3.4
Information an	Inhalt	Funktion
BÜ-Steuerung	Bedarf melden	3.5
	Zustand Gefahrenraum melden	3.6
	Rückstau melden	3.7
Diagnose	Störung optisches System melden	3.8

Tabelle 6-1: Informationen des optischen Systems

### Ableitung möglicher Fehler

- Mögliche Fehler bei der Funktion „Bedarf melden“
  - Der Bedarf wird nicht übermittelt
  - Bedarf erkannt gesendet, obwohl kein StVTn vor BÜ
- Mögliche Fehler bei der Funktion „Rückstau melden“
  - Rückstaumeldung wird fälschlicherweise nicht übermittelt
  - Fälschlicherweise Rückstau übermittelt
- Mögliche Fehler bei der Funktion „Zustand Gefahrenraum melden“
  - Zustand des GF wird nicht übermittelt
  - Fälschlicherweise GF frei übermittelt
  - Fälschlicherweise GF nicht frei übermittelt
- Mögliche Fehler bei der Funktion „Störung optisches System melden“
  - Störung wird nicht gemeldet
  - Störung wird fälschlicherweise gemeldet

### Aus Fehlern mögliche Gefährdungen ableiten

- Funktion „Bedarf melden“
  - Wird der Bedarf nicht an die BÜ-Steuerung übermittelt, erhält die BÜ-Steuerung keine Information, dass ein StVTn den BÜ queren möchte. Die Schranken werden deshalb nicht geöffnet.
    - Hieraus kann keine Sicherheitsrelevanz abgeleitet werden, da der BÜ jederzeit geschlossen bleibt und damit für den Zugverkehr gesichert ist. StVTn können den BÜ nicht betreten.
  - Meldet das optische System einen Bedarf zur Überquerung des BÜ an, obwohl dieser Bedarf nicht vorliegt, so leitet die BÜ-Steuerung ein Öffnen der Schranken ein, obwohl niemand den BÜ überqueren möchte.
    - Hieraus kann keine Sicherheitsrelevanz abgeleitet werden, da die Schranken nur geöffnet werden, wenn keine Zugfahrt anliegt. Nach einer gewissen Zeit wird der BÜ wieder geschlossen.

- Funktion „Rückstau melden“
  - Wird ein Rückstau nicht gemeldet, so leitet die BÜ-Steuerung das Schließen des BÜ ein, obwohl sich noch Fahrzeuge auf dem BÜ befinden. Jedoch wird anschließend der GF auf Freisein überprüft. Hierbei werden evtl. vorhandene Fahrzeuge auf dem BÜ erkannt. Es ist zu beachten, dass „Rückstau melden“ und „Zustand Gefahrenraum melden“ vom gleichen System übernommen werden.
    - Hieraus kann keine den Betrieb gefährdende Sicherheitsrelevanz abgeleitet werden, da hier nur davon ausgegangen wird, dass die Funktion „Rückstau melden“ ausfällt, aber nicht die Funktion „Zustand Gefahrenraum melden“. Jedoch können beim Schrankenschließen Personen gefährdet werden, weshalb eine Sicherheitsrelevanz angenommen wird.
  - Wird fälschlicherweise ein Rückstau gemeldet, so leitet die BÜ-Steuerung das Schließen der Schranken nicht ein, solange noch der Rückstau gemeldet wird. Damit wird in der Zeit aber auch kein Signal BÜ1 angezeigt.
    - Hieraus kann keine Sicherheitsrelevanz abgeleitet werden, da der Zug vor dem BÜ zum Stehen kommt und somit keine Gefahr besteht.
- Funktion „Zustand Gefahrenraum melden“
  - Wird der Zustand des GF nicht übermittelt, so werden die Schranken nicht geschlossen, da sich z.B. unerkannt Personen unter den Schranken befinden können. Ein Mitarbeiter kann sich auf das optische System schalten um den GF zu prüfen. Solange dies nicht geschieht, bleibt das Überwachungssignal auf BÜ0.
    - Hieraus kann keine Sicherheitsrelevanz abgeleitet werden, da keine Zugfahrt über den BÜ stattfinden wird, denn der Zug hält vor dem BÜ aufgrund des Überwachungssignals.
  - Wird vom optischen System fälschlicherweise der Zustand „Gefahrenraum frei“ übermittelt, obwohl dieses nicht der Fall ist, so schließt die BÜ-Steuerung die Schranken.
    - Hieraus kann eine Sicherheitsrelevanz abgeleitet werden, da die Schranken geschlossen werden, obwohl der GF nicht frei ist. Es kann zu einer Verletzung kommen, wenn sich eine Schranke auf eine Person senkt oder sogar zu einem Zusammenprall, wenn ein StVTn zwischen den Schranken eingesperrt wird.
  - Wird vom optischen System fälschlicherweise der Zustand „Gefahrenraum nicht frei“ übermittelt, obwohl dieser frei ist, so schließen die Schranken nicht. Ein herannahender Zug wird dann durch das Überwachungssignal gewarnt.
    - Hieraus kann keine Sicherheitsrelevanz abgeleitet werden, da die Schranken erst schließen, wenn der GF frei gemeldet wurde und der Zug den BÜ so lange nicht befährt, bis der BÜ gesichert wird.
- Funktion „Störung optisches System melden“
  - Das Melden von Störungen an die Diagnose hat nur informativen Charakter und dient zur besseren Wartung.

- Hieraus kann keine Sicherheitsrelevanz abgeleitet werden, da hier nur Informationen für die Wartung übermittelt werden.

### **Bewertung und Ableiten der Sicherheitsrelevanz des Optischen System**

- Die Funktion „Bedarf melden“ besitzt keine gefährdenden Eigenfunktionalitäten. Daher kann „Bedarf melden“ als nicht sicherheitsrelevant eingestuft werden. Diese Funktion hat keine sicherheitskritischen Eigenschaften und benötigt demnach keine Einstufung nach SIL (SIL = 0).
- Die Funktion „Rückstau melden“ besitzt gefährdende Eigenfunktionalitäten. Daher kann „Rückstau melden“ als sicherheitsrelevant eingestuft werden. Diese Funktion ist einzeln betrachtet als sicherheitskritisch und somit  $SIL > 0$  einzustufen, da bei Nicht-erkennen des Verkehrs eine gefährliche Situation entstehen kann.
- Die Funktion „Zustand Gefahrenraum melden“ besitzt gefährdende Eigenfunktionalitäten. Daher muss „Zustand Gefahrenraum melden“ als sicherheitsrelevant eingestuft werden. Dies ist eine sicherheitskritische Funktion, da ein Nichterkennen eines Objektes im Gefahrenraum zu einem Unfall führen kann. Es ist mit einer Stufe von SIL 3 nach EN 50129 für eine GFR zu rechnen, da derzeit diese SIL-Einstufung gefordert wird (vgl. [DB02]).
- Ableitung der Sicherheitsanforderungsstufe: Das System ist einzeln betrachtet als sicherheitsrelevant ( $SIL > 0$ ) einzustufen. Diese Einstufung kann jedoch insofern vermieden werden, wenn das einzusetzende Sensorsystem als Teilsystem nicht selbst die hohen Sicherheitsanforderungen erfüllen muss. Dies ist dann möglich, wenn die Sicherheit des Verfahrens des Gesamtsystems unter Verwendung austauschbarer Komponenten erfolgt. In diesem Fall wäre die Stereo-Kamera-GFR mit  $SIL = 0$  ausführbar.

Die Automatisierung der Anrufschränke bietet für die Einführung eines optischen Systems hervorragende Randbedingungen, da bei zweifelhafter Ausgangssituation die Schranken in Grundstellung verharren, und ein sicherer Zustand nicht in den unsicheren wechseln wird. Dadurch kann eine Zulassung für das Gesamtsystem optiBÜSA eine Zulassung der Sensortechnologie optischer Systeme ermöglichen. Es ist weiterhin positiv zu bewerten, dass im Vergleich zum Hinhören bei Anrufschränken eine Stereo-Kamera-GFR die Anforderungen an die Sicherheit erreicht. Die Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit des Systems muss mit einem Demonstrator über einen langen Zeitraum nachgewiesen werden. Mit der dauerhaften Erprobung unter realen Einsatzbedingungen wird der Nachweis der Sicherheit möglich. Die vorliegende Arbeit konnte zur Vorbereitung eines Demonstratoraufbaus die Systemkonzeption bzgl. Sicherheitsanforderungen positiv verifizieren.

## **6.2 Bewertung der betrieblichen Eignung**

Im Folgenden wird optiBÜSA hinsichtlich der betrieblichen Eignung bewertet. Dafür wird der Leitfaden zur Bewertung der betrieblichen Eignung (vgl. Kapitel 3.3) um optiBÜSA erweitert. Mit Hilfe des BÜSA-Leitfadens wird anschließend beispielhaft die optimale BÜSA für einen Bahnübergang ermittelt. Für den Nachweis, dass durch optiBÜSA die erforderlichen Funktionen erfüllt werden, erfolgt zunächst ein Vergleich mit dem BÜSA-Konzept Anrufschränke.

### 6.2.1 Einordnung von optiBÜSA in den BÜSA-Kontext

Ein erforderlicher Bewertungsschritt ist der Systemvergleich auf funktionaler Ebene. Dies bedeutet, dass die Funktionen und ausführenden Komponenten der Anrufschränke denen des neuen Konzeptes optiBÜSA gegenübergestellt werden (siehe Tabelle 6-2). Bei der Anrufschränke werden die Funktionen (zumindest in Teilen) vom Bediener übernommen. Mit optiBÜSA wird eine autarke BÜSA eingesetzt, welche diese Funktionen automatisiert umsetzt.

Funktion der Anrufschränke	Komponenten für die Erfüllung der Funktionen	
	Anrufschränke	optiBÜSA
Straßenseitigen Bedarf erkennen	Wechselsprechanlage	Optisches System + Taster
Bedarf entgegennehmen	Bediener	BÜ-Steuerung
StVtN signalisieren, dass er erkannt wurde	Bediener über Wechselsprechanlage	BÜ-Steuerung über Lichtzeichen
Überprüfen, ob Zugposition das Öffnen der Schranken zulässt	Bediener	Einschaltelement / Funkanrückmelder
Öffnen des BÜ einleiten	Bediener	BÜ-Steuerung
Erkennen, dass StVtN BÜ geräumt hat	Bediener über Wechselsprechanlage	Optisches System
StVtN signalisieren, dass BÜ geschlossen wird	akustische Warnung von Bediener über Wechselsprechanlage	Lichtzeichen
Schließen des BÜ einleiten	Bediener	BÜ-Steuerung
Überwachen des Schrankenschließens	keine Möglichkeit	Optisches System
GF überprüfen	teilweise durch Bediener (nur, was durch Hören erkannt wird)	vollständig durch optisches System
Erkennen, wenn Zug den BÜ passiert hat	Bediener über Wechselsprechanlage	Ausschaltelement
BÜ sichern	Schranken	Schranken + Lichtzeichen
Zug mitteilen, dass BÜ gesichert	Keine Möglichkeit	Überwachungssignal
Zug warnen, falls BÜ nicht gesichert	Bediener durch Blocksinal	Überwachungssignal

Tabelle 6-2: Vergleich der Umsetzungen der Funktion bei Anrufschränke und optiBÜSA

Bezug nehmend auf die an ein bedarfsgesteuertes Sicherungsverfahren gestellten Anforderungen (vgl. Kapitel 4), werden die Eigenschaften der Anrufschränke V(A) mit H/ÜS und optiBÜSA verglichen. Die Gegenüberstellung (siehe Tabelle 6-3) bezieht sich dabei ausschließlich auf die geforderten betrieblichen und sicherungstechnischen Funktionen.

Geforderte Eigenschaften einer automatischen und bedarfsgesteuerten Schrankenanlage	Erfüllung		
	V(A)	H/ÜS	optiBÜSA
Automatische straßenseitige Bedarfssteuerung (Erkennen des straßenseitigen Bedarfs, Veranlassung des Schrankenöffnens)	NEIN	NEIN	JA
Autarke Betriebsweise (keine Schnittstelle zu einem Stellwerk, Triebfahrzeugführer überwacht Zustand des Bahnübergangs)	NEIN	JA	JA
Offenbarung des BÜ-Zustands gegenüber dem Triebfahrzeugführer (ermöglicht rechtzeitiges Halten vor einem ungesicherten Bahnübergang)	NEIN	JA	JA
Automatische (technische) Überwachung des Schrankenschließens	NEIN	NEIN	JA
Automatische (technische) Gefahrenraumüberwachung	NEIN	NEIN	JA
Automatische (technische) Rückstauerkennung	NEIN	NEIN	JA

V(A) – Anrufschränke; H/ÜS – Halbschrankenanlage mit der Überwachungsart ÜS

Tabelle 6-3: Erfüllungsgrad der Sicherungsarten bzgl. der geforderten Eigenschaften

Nach den Vergleichen von optiBÜSA mit den Referenzsystemen kann nun die betrieblich-technische Einordnung anhand der Kriterien erfolgen. Hierfür wurde der BÜSA-Leitfaden (vgl. Kapitel 3) um optiBÜSA erweitert und die straßenseitigen (siehe Tabelle 6-4) und schienenseitigen (siehe Tabelle 6-5) Ausprägungen der Kriterien dokumentiert. Eine 1 steht für die Erfüllung des Kriteriums durch optiBÜSA, eine 0 für die Nichterfüllung und 2 für die besonders vorteilhafte Erfüllung des Kriteriums. Wie gezeigt wird, erfüllt optiBÜSA die betrieblichen Anforderungen. Von daher erfüllt optiBÜSA die Eigenschaften von Anrufschraken und kann entsprechend an den für Anrufschraken üblichen Bahnübergängen eingesetzt werden.

Nr.	Straßenseitige Kriterien	Ausprägung	optiBÜSA
Rechtliche Mindestanforderungen an die Sicherung des BÜ nach Ril 815.0010 und EBO §11			
1	Hauptbahnen und Nebenbahnen mit $v_{Tfz} > 160$ km/h	Ja 1 / Nein 0	0
	Hauptbahnen und Nebenbahnen mit $v_{Tfz} > 80$ km/h	Ja 1 / Nein 0	1
	Nebenbahnen mit $v_{Tfz} \leq 80$ km/h und Nebengleise, mehrgleisig	Ja 1 / Nein 0	1
	Nebenbahnen mit $v_{Tfz} \leq 80$ km/h und Nebengleise, eingleisig	Ja 1 / Nein 0	1
2	starker Verkehr	Ja 1 / Nein 0	0
	mäßiger Verkehr, ausgenommen Feld- und Waldwege	Ja 1 / Nein 0	0
	mäßiger Verkehr auf Feld- und Waldwegen	Ja 1 / Nein 0	0
	schwacher Verkehr, ausgenommen Feld- und Waldwege	Ja 1 / Nein 0	1
	schwacher Verkehr auf Feld und Waldwegen	Ja 1 / Nein 0	1
	Fuß- und Radwege	Ja 1 / Nein 0	1
	Privatübergänge ohne öffentlichen Verkehr (öV) mit $v_{Tfz} > 140$ km/h	Ja 1 / Nein 0	1
	Privatübergänge ohne öV mit $v_{Tfz} \leq 140$ km/h	Ja 1 / Nein 0	1
	Privatübergänge mit öV in Hafen- und Industriegebieten bei schwachem und mäßigem Verkehr	Ja 1 / Nein 0	1
Straßenseitige Kriterien			
3	Sind Fuß- und Radwege Bestandteil der Straße? Ril 815.0032 (5)	Ja	1
		Nein	1
4	Anteil Schwerlastverkehr? Ril 815.0010 (8)	Hoch	1
		Irrelevant	1
5	Ist eine Beleuchtung des BÜ notwendig? Ril 815.0031 (5), 815.0032 (5)	Ja	1
		Nein	1
6	Geringe Breite des BÜ? Ril 815.0030 (2)	Ja	2
		Nein	1
7	Örtliche Besonderheiten wie Schulen, Krankenhäuser etc.? Ril 815.0010 (8)	Ja	0
		Nein	1
8	Ist zukünftig eine Ansiedlung von Gewerbegebieten, Einkaufszentren oder sonstigen Verkehr erzeugenden Faktoren geplant?	Ja	0
		Nein	1
9	Befindet sich parallel zur Strecke eine stark befahrene Straße? Ril 815.0010 (8)	Ja	2
		Nein	1
Betriebliche Kriterien			
10	Hohe Zugdichte? Ril 815.0010 (8)	Ja	1
		Nein	1
11	Annäherungszeit der Züge Ril 815.0033 (2)	20 - 90 s	1
		26 - 240 s	1
		> 240 s	1
Variable straßenseitige Kriterien			
12	Ist eine Minimierung der Sperrzeiten wünschenswert?	Ja	1
		Nein	1
Straßenseitiges technisch - betriebliches Optimum			

Tabelle 6-4: Bestimmung der Ausprägung der straßenseitigen Kriterien von optiBÜSA

Nr.	Schienenseitige Kriterien	Ausprägung	optiBÜSA
<b>Nicht beeinflussbare Basis-Kriterien</b>			
1	Ausrüstung der Strecke mit techn. Sicherung	Ja	1
		Nein	1
2	Schnittstelle zum Stellwerk vorhanden	Ja	1
		Nein	1
3	BÜ in Stellwerksabhängigkeit	Ja	1
		Nein	1
4	Hauptsignal vorhanden	Ja	1
		Nein	1
5	BÜ-Nähe	Nein	1
		Ja, nichttechn. Sicherung	1
		Ja, technische Sicherung	1
6	BÜ-BÜ-Abhängigkeit erforderlich	Nein	1
		Fü	0
		ÜS	1
		ÜSOE	0
		Hp	1
		Hp/ÜS	1
		Hp/Fü	0
7	BÜ im Durchrutschweg	Ja	0
		Nein	1
8	Streckenhöchstgeschwindigkeit	60	1
		80	1
		120	1
		160	1
9	Anzahl der Gleise	Eingleisig	1
		Mehrgleisig	1
10	Schrankenanlage mit Vollabschluss erforderlich	Ja	2
		Nein	1
11	BÜ auf einer Strecke, diese parallel zu stark befahrener Hauptstraße	Ja	2
		Nein	1
<b>Beeinflussbare Basis-Kriterien</b>			
12	Einbindung in Betriebszentrale möglich	Ja	1
		Nein	1
13	Autarker Betrieb wünschenswert	Ja	2
		Nein	1
14	BÜ in Stellwerksabhängigkeit setzen	Ja	1
		Nein	1
15	Überwachung Einschaltung erforderlich	Ja	2
		Nein	1
16	Überwachung Einschaltbereitschaft erforderlich	Ja	0
		Nein	1
<b>Abhängigkeitskriterien</b>			
17	BÜ-BÜ-Kette zur Kostenreduktion gewünscht	Ja	1
		Nein	1
18	Einsatz bei ETCS gewünscht	Ja	1
		Nein	1
19	Schließzeiten am BÜ	möglichst gering	0
		irrelevant	1
<b>Schienenseitiges technisch - betriebliches Optimum</b>			

Tabelle 6-5: Bestimmung der Ausprägung der schienenseitigen Kriterien durch optiBÜSA

### 6.2.2 Wahl der optimalen BÜSA für einen Beispielbahnübergang

Die Einordnung von optiBÜSA in den BÜSA-Kontext erfolgte mittels des erfüllbaren Kritikalitäten-Mixes. Damit ist die Betrachtung der betrieblichen Eignung anhand eines Beispielbahnübergangs umsetzbar. In diesem Abschnitt wird anhand eines Bahnübergangsszenarios die Wahl der geeigneten BÜSA durchgeführt.

#### Beschreibung der Ausgangssituation

Der Beispielbahnübergang liegt an einem schwach befahrenen, nicht befestigten Weg, der als einziger Zugang für eine landwirtschaftliche Nutzfläche dient (vgl. Abbildung 6-3 [Foto links: Scheidt & Bachmann GmbH], [Foto rechts: Google AG]).



**Abbildung 6-3: Beispielbahnübergang für eine Sicherung mit optiBÜSA**

Der Weg wird im weiteren Verlauf einer Bundesstraße zugeführt, die parallel zu der Bahnstrecke verläuft. Im Regelfall erfolgt die straßenseitige Benutzung ausschließlich durch landwirtschaftliche Fahrzeuge. Auf der eingleisigen Bahnstrecke verkehren die Züge mit einer mäßigen bis hohen Zugdichte und einer Geschwindigkeit von  $v_{Tfz} = 80 \text{ km/h}$ . Der Bahnübergang wurde in der Vergangenheit aufgrund geringer Kritikalitäten nichttechnisch gesichert. Aufgrund eines Anstiegs des Zugverkehrs ist die Strecke stärker belastet. Im Zuge von Optimierungsmaßnahmen soll die Geschwindigkeit auf  $v_{Tfz} = 120 \text{ km/h}$  erhöht werden.

Ermittelt man die optimale BÜSA für das Beispiel (ohne optiBÜSA als Wahlmöglichkeit), ist die straßenseitige Sicherung durch Schranken (V, HH) oder Halbschranken (H) umzusetzen (vgl. Abbildung 6-4). Die Anrufschränke V(A) ist aufgrund der Forderung nach autarkem Betrieb nicht mehr geeignet.

				technische Sicherung			
Nr.	Kriterium	Ausprägung	Auswahl	V, HH	H+Lz	Lz	V(A)
Straßenseitiges technisch - betriebliches Optimum				2	2	0	0

**Abbildung 6-4: Ergebnis bei Änderungen am Beispielbahnübergang (Teil A)**



Bei der Ermittlung der optimalen schienenseitigen Sicherung ist ÜS und ÜS<sub>OE</sub> ausgewählt worden, wobei ÜS zu favorisieren ist (vgl. Abbildung 6-5).

				Überwachungsart					
Nr.	Kriterium	Ausprägung	Auswahl	ÜS	Fü	Hp	ÜSOE	Hp/ÜS	Hp/Fü
Schienseitiges technisch - betriebliches Optimum				4	0	0	2	0	0

**Abbildung 6-5: Ergebnis bei Änderungen am Beispielbahnübergang (Teil B)**

Da Halbschrankenanlagen wirtschaftlicher gegenüber Schrankenanlagen mit der derzeit verfügbaren GFR einzustufen sind, ist für das Beispiel die Sicherung H/ÜS auszuwählen.

### Betriebliche Eignung

Zuerst werden die zu erfüllenden straßenseitigen und schienenseitigen Kritikalitäten im BÜSA-Leitfaden eingetragen. Mit der Zahl 1 in der Spalte Auswahl wird angegeben, welche Anforderungen an die neue BÜSA des Beispielbahnübergangs gestellt werden. Die Werte unterhalb der Sicherungs- und Überwachungsarten geben an, ob und wie gut diese für das jeweilige Kriterium und dessen Ausprägung geeignet sind. Für die Bewertung werden die Felder die durch die Zeile der Auswahl gekennzeichnet sind je Sicherungsart multipliziert (weiterführende Anwendungshinweise zum BÜSA-Leitfaden sind im Anhang A.3 aufgeführt).

#### Teil A: Wahl der straßenseitigen Sicherung für das Fallbeispiel

Das Ergebnis der Untersuchung in Teil A (vgl. Tabelle 6-6) zeigt auf, dass eine technische Sicherung mit Schranken (in der Ausprägung: voll abschließender Schrankenbaum (V), doppelte halbabschließende Schrankenbäume (HH), vollabschließende Schrankbäume in Grundstellung geschlossen (Anrufschränke oder optiBÜSA)) und Halbschranken realisiert werden kann, wobei eine Sicherung mit Schranke für dieses Beispiel bevorzugt wird. Die Sicherung mit Anrufschränke ist zukünftig nicht mehr möglich, daher ist die Sicherung aus technisch-betrieblicher Sicht entweder durch V, HH oder optiBÜSA zu bevorzugen.

Nr.	Kriterien	Ausprägung	Auswahl 1 / 0	V, HH	H+Lz	Lz	V(A)	optiBÜSA
1	Hauptbahnen und Nebenbahnen mit $v_{Tfz} > 160$ km/h	Ja / Nein	0	0	0	0	0	0
	Hauptbahnen und Nebenbahnen mit $v_{Tfz} > 80$ km/h	Ja / Nein	1	1	1	1	1	1
	Nebenbahnen mit $v_{Tfz} \leq 80$ km/h und Nebengleise, mehrgleisig	Ja / Nein	0	1	1	0	1	1
	Nebenbahnen mit $v_{Tfz} \leq 80$ km/h und Nebengleise, eingleisig	Ja / Nein	0	1	1	1	1	1
2	starker Verkehr	Ja / Nein	0	1	1	0	0	0
	mäßiger Verkehr, ausgenommen Feld- und Waldwege	Ja / Nein	0	1	1	0	0	0
	mäßiger Verkehr auf Feld- und Waldwegen	Ja / Nein	0	1	1	0	0	0
	schwacher Verkehr, ausgenommen Feld- und Waldwege	Ja / Nein	0	1	1	0	1	1
	schwacher Verkehr auf Feld und Waldwegen	Ja / Nein	1	1	1	0	1	1
	Fuß- und Radwege	Ja / Nein	0	1	1	0	1	1
	Privatübergänge ohne öV mit $v_{Tfz} > 140$ km/h	Ja / Nein	0	1	1	0	1	1
	Privatübergänge ohne öV mit $v_{Tfz} \leq 140$ km/h	Ja / Nein	0	1	1	0	1	1
	Privatübergänge mit öV in Hafen- und Industriegebieten bei schwachem und mäßigem Verkehr	Ja / Nein	0	1	1	0	1	1

Nr.	Kriterien	Ausprägung	Auswahl 1 / 0	V, HH	H+Lz	Lz	V(A)	optiBÜSA
3	Sind Fuß und Radwege Bestandteil der Straße? Ril 815.0032 (5)	Ja	1	1	1	1	1	1
		Nein	0	1	1	1	1	1
4	Anteil Schwerlastverkehr? Ril 815.0010 (8)	Hoch	0	1	1	1	1	1
		Irrelevant	1	1	1	1	1	1
5	Ist eine Beleuchtung des BÜ notwendig? Ril 815.0031 (5), 815.0032 (5)	Ja	0	1	1	1	1	1
		Nein	1	1	1	1	1	1
6	Geringe Breite des BÜ? Ril 815.0030 (2)	Ja	1	1	1	1	2	2
		Nein	0	1	1	1	1	1
7	Örtliche Besonderheiten wie Schulen, Krankenhäuser etc.? Ril 815.0010 (8)	Ja	0	2	1	0	0	0
		Nein	1	1	1	1	1	1
8	Ist zukünftig eine Ansiedlung von Gewerbegebieten, Einkaufszentren oder sonstigen Verkehr erzeugenden Faktoren geplant?	Ja	0	2	2	0	0	0
		Nein	1	1	1	1	1	1
9	Befindet sich parallel zur Strecke eine stark befahrene Straße? Ril 815.0010 (8)	Ja	1	2	1	1	1	2
		Nein	0	1	1	1	1	1
10	Hohe Zugdichte? Ril 815.0010 (8)	Ja	1	2	1	0	2	1
		Nein	0	1	1	1	1	1
11	Annäherungszeit der Züge Ril 815.0033 (2)	20 - 90 s	0	1	1	1	1	1
		26 - 240 s	1	1	1	0	1	1
		> 240 s	0	1	0	0	1	1
12	Ist eine Minimierung der Sperrzeiten wünschenswert?	Ja	0	1	2	2	0	1
		Nein	1	1	1	1	1	1
Straßenseitiges technisch - betriebliches Optimum				4	1	0	4	4

Tabelle 6-6: Wahl der strabenseitig optimalen Sicherung für das Fallbeispiel

Teil B: Wahl der Überwachungsart für das Fallbeispiel

Nach Ermittlung der strabenseitig zulässigen Sicherungsarten wird im Teil B schienenseitig die technisch-betrieblich optimale Überwachungsart bestimmt. Die Wahl der schienenseitigen Kriterien muss sich dabei auf die zuvor festgelegten strabenseitigen Kriterien beziehen. Die Auswahl (siehe Tabelle 6-7) weist nach, dass von den bisher bekannten Überwachungsarten ÜS die geeignete für das Beispiel ist. Im fünften Kapitel wurde ÜS als optimale Überwachungsart für optiBÜSA ermittelt. Mit dieser Untersuchung wird dies bestätigt. Da optiBÜSA neben den Eigenschaften von ÜS bestimmte Kriterien anders erfüllt, als dies nur durch ÜS erfüllbar wäre, ist die Wahl der optimalen Überwachungsart für das Beispiel auf optiBÜSA gefallen (acht Bewertungspunkte).

Nr.	Kriterien	Ausprägung	Auswahl 1 / 0	ÜS	Fü	Hp	ÜS <sub>OE</sub>	Hp/ÜS	Hp/Fü	opti BÜSA
1	Strecke mit techn. Sicherung	Ja	1	1	1	1	1	1	1	1
		Nein	0	1	1	0	1	0	0	1
2	Schnittstelle zum Stellwerk	Ja	1	1	2	2	1	1	1	1
		Nein	0	1	1	1	1	1	1	1
3	BÜ in Stellwerksabhängigkeit	Ja	0	0	1	2	0	1	2	1
		Nein	1	1	1	1	1	1	1	1
4	Hauptsignal vorhanden	Ja	0	1	1	1	1	1	1	1
		Nein	1	1	1	0	1	0	0	1
5	BÜ-Nähe	Nein	1	1	1	1	1	1	1	1
		Ja, nichttechn. Sicherung	0	1	1	1	1	1	1	1
		Ja, technische Sicherung	0	1	1	1	1	1	1	1
6	BÜ-BÜ-Abhängigkeit erforderlich	Nein	1	1	1	1	1	1	1	1
		Fü	0	0	1	1	0	0	1	0
		ÜS	0	1	0	1	1	1	0	1
		ÜS <sub>OE</sub>	0	1	0	1	2	1	0	0
		Hp	0	1	1	1	1	1	1	1
		Hp/ÜS	0	1	0	1	1	1	0	1
		Hp/Fü	0	0	1	1	0	0	1	0
7	BÜ befindet sich im Durchrutschweg	Ja	0	0	0	1	0	1	1	0
		Nein	1	1	1	1	1	1	1	1

Nr.	Kriterien	Ausprägung	Auswahl 1 / 0	ÜS	Fü	Hp	ÜS <sub>OE</sub>	Hp/ÜS	Hp/Fü	opti BÜSA
8	Streckenhöchstgeschwindigkeit	a) 60 km/h	0	1	1	1	1	1	1	1
		b) 80 km/h	0	1	1	1	1	1	1	1
		c) 120 km/h	1	1	1	1	1	1	1	1
		d) 160 km/h	0	1	1	1	1	1	1	1
9	Anzahl der Gleise	Eingleisigkeit	1	1	1	1	1	1	1	1
		Mehrgleisigkeit	0	1	1	1	1	1	1	1
10	Schrankenanlage mit Vollabschluss erforderlich	Ja	1	1	0	1	0	1	0	2
		Nein	0	1	1	1	1	1	1	1
11	BÜ auf einer Strecke, diese parallel zu stark befahrener Hauptstraße	Ja	1	1	1	1	1	1	1	2
		Nein	0	1	1	1	1	1	1	1
12	BZ-Tauglichkeit	Ja	1	1	0	1	1	1	0	1
		Nein	0	1	1	1	1	1	1	1
13	Autarker Betrieb wünschenswert	Ja	1	2	0	0	2	0	0	2
		Nein	0	1	1	1	1	1	1	1
14	BÜ in Stellwerksabhängigkeit setzen	Ja	0	0	1	1	0	1	1	1
		Nein	1	1	0	0	1	0	0	1
15	Überwachung der Einschaltung erforderlich	Ja	1	1	0	0	1	1	0	1
		Nein	0	1	1	1	1	1	1	1
16	Überwachung der Einschaltbereitschaft erforderlich	Ja	0	0	1	0	1	0	1	0
		Nein	1	1	1	1	1	1	1	1
17	BÜ-BÜ-Kette herstellen	Ja	0	1	1	0	1	1	1	1
		Nein	1	1	1	1	1	1	1	1
18	Einsatz bei ETCS gewünscht	Ja	1	1	0	1	0	1	0	1
		Nein	0	1	1	1	1	1	1	1
19	Schließzeiten am BÜ	möglichst gering	0	1	1	0	1	1	1	0
		irrelevant	1	1	1	1	1	1	1	1
Schienseitiges technisch-betriebliches Optimum				2	0	0	0	0	0	8

Tabelle 6-7: Wahl der optimalen Überwachungsart für das Fallbeispiel

Mit Hilfe des BÜSA-Leitfadens konnte für das Beispiel verdeutlicht werden, dass optiBÜSA sowohl straßen- als auch schienenseitig die technisch-betrieblich optimale BÜSA darstellt. Da jeder BÜ für sich betrachtet wird, kann hieraus keine Allgemeingültigkeit für die Einsetzbarkeit von optiBÜSA abgeleitet werden. Jedoch wird aus Teil A deutlich, dass optiBÜSA den Platz von Anrufschraken einnehmen kann. Aus Teil B ist erkennbar, dass ÜS eine sinnvolle Überwachungsart für optiBÜSA auf freier Strecke ist. Für dieses Beispiel ist der direkte Vergleich der Kosten für die Wahl der betrieblich-wirtschaftlich optimalen BÜSA aufgrund fehlender Absolutwerte nicht durchführbar.

Die Bewertung der Wirtschaftlichkeit und damit des Nutzens einer Entwicklung von optiBÜSA wird im folgenden Abschnitt mittels frei wählbarer Kriterien durchgeführt.

### 6.3 Nutzwertbasierte Analyse

Der erwartete Nutzen von optiBÜSA spiegelt sich im Wesentlichen durch folgende Ergebnisse der Konzeption wider:

- Erhalt der Anrufschraken-Kernfunktionen, dadurch Verzicht auf umfangreiche Baumaßnahmen bei Erneuerungsmaßnahmen abgängiger Anrufschraken.
- Rückstauerdetektor zur Unterstützung von anderen BÜSA nahe paralleler Straßen.
- Eine neue GFR mit einem Stereo-Kamera-System: Der beschriebene Lösungsansatz hat den Anspruch, die Nachteile des Radar-GFR zu eliminieren. Angestrebt ist ein Verfahren zur Überwachung des Gefahrenraumes, welches sämtliche Objekte zwi-

schen den Schranken und vor diesen differenziert detektiert. Vorteilhaft an dem technologischen Ansatz mit optischen Systemen ist, dass es für eine Gefahrenraumüberwachung eingesetzt werden kann und weitere Funktionen ermöglicht, z.B. eine Live-Bild-Übertragung zu einem Bediener. Das ist mit keiner anderen Technologie realisierbar. Vorteilhaft gegenüber Lösungen mit einem Bediener sind die Ermüdungsfreiheit und eine objektive Gefahreneinschätzung durch das System.

- Reduktion der LCC an BÜSA die bisher mit Anrufschränke ausgerüstet sind. Insgesamt sind dadurch die Anlagenkosten verschiedener BÜSA-Konzepte reduzierbar, wodurch u. a. mehr Bahnübergänge technisch gesichert werden, die bisher aufgrund zu hoher Anlagenkosten oder fehlender Sicherungsmöglichkeiten nichttechnisch gesichert wurden.
- Höhere Streckenkapazität: Mittels geringerer Kosten für eine technische Bahnübergangssicherung können Streckengeschwindigkeiten angehoben und die Fahrzeiten verkürzt werden. Somit kann eine größere Anzahl von Trassen vergeben werden. Eine höhere Streckenkapazität wird indirekt über eine höhere Leistungsfähigkeit der vorhandenen Strecken durch Beseitigung der durch nichttechnisch gesicherte Bahnübergänge bedingten Langsamfahrstellen erreicht.
- Niedriger Duty Cycle: Der Einsatz von optiBÜSA bedingt aufgrund der geringen Einschaltzeiten und geringen Betriebsstunden einen reduzierten Duty Cycle gegenüber den bisher eingesetzten Ablösekzepten. Dies führt zur reduzierten Abnutzungerscheinungen der Anlagenkomponenten und letztendlich zur Verringerung von Wartungs- und Instandhaltungskosten gegenüber heutiger BÜSA.

### Durchführung einer Wirtschaftlichkeitsanalyse

Für einen bewertbaren Nachweis des Nutzens von optiBÜSA wird für das in Kapitel 6.2.2 beschriebene Bahnübergangsbeispiel eine erweiterte Wirtschaftlichkeitsanalyse (EWA) nach Zangemeister [Zan93] durchgeführt (vgl. Kapitel 3.2). Mit dieser Analyse wird optiBÜSA betrieblich-wirtschaftlich bewertet. Im vierten Kapitel wurde dargestellt, dass eine BÜSA mit Halbschranken und der Überwachungsart ÜS (H/ÜS) heutzutage eine übliche Ersatzmaßnahme bei abgängigen Anrufschränken ist. Eine BÜSA H/ÜS repräsentiert somit den Verbesserungsansatz, der nach heutigem Technikstand eingebaut würde und optiBÜSA den alternativen und innovativen Ansatz für künftige Maßnahmen, weshalb die Analyse im Vergleich dieser Varianten durchgeführt wird.

Aufgrund der bisher ausschließlich konzeptionellen Umsetzung von optiBÜSA wird eine exakte Ermittlung und Berechnung realer Kosten nicht erfolgen können. Für diese Bewertung wird eine qualitative Einschätzung durchgeführt, indem nachfolgend Kostenannahmen mit der Unterteilung hoch, mittel und gering getroffen werden. Die Kostenannahmen basieren auf den in Kapitel 4 ermittelten Kostentreibern und Kostensenkungspotenzialen. Den Kostenannahmen werden Zahlen von eins bis zwölf zugeordnet (gering: 1, 2, 3, 4; mittel: 5, 6, 7, 8; hoch: 9, 10, 11, 12), wobei diese für die Abschätzung von Geldwerten in Euro gelten. Werden in weiterführenden Arbeiten Aussagen zu den Realkosten von optiBÜSA ermittelbar, können diese Werte anstelle der Kosteneinschätzungen eingesetzt werden.

Ergebnisse der Stufen 1 und 2

Die Tabelle 6-8 zeigt die direkt monetären und der indirekt monetären Bewertungskriterien für den Vergleich einer Halbschrankenanlage mit der Überwachungsart ÜS und optiBÜSA. Die jeweiligen Kostenannahmen sind entsprechend der Inhalte aus Kapitel 4 abgeschätzt. Sind reale Geldwerte in Euro bekannt, können diese konkretisiert werden.

Das Ergebnis der ersten und zweiten Stufe der EWA ergaben die in Tabelle 6-9 aufgeführten Durchschnittswerte der Kostenannahmen.

Bewertungskriterien	optiBÜSA		H/ÜS	
	Kosten- annahme	Begründung	Kosten- annahme	Begründung
<b>Direkt monetär</b>				
Investition (bei folgender Annahme: 1 = 0 € 12 = 600T€)	5	Bewährte Technik (ggf. teilweise Wiederverwendung des Bestands). Keine Straßenbaumaßnahme erforderlich. Mehrkosten durch optisches System (Zielkosten geringer als Radar-GFR als Bedingung).	11	Bewährte Technik. Umfangreicher und kostenintensiver Straßenbau. Jedoch keine Radar-GFR erforderlich.
Instandhaltung (aufgrund Verschleiß)	4	Bedarfsgesteuerter Betrieb, dadurch seltene Einschaltung der BÜSA und geringer Verschleiß.	9	Ein- und Ausschalten der BÜSA bei jeder Zugfahrt.
Betriebskosten	3	Bedarfsgesteuerter Betrieb, dadurch seltene Einschaltung der BÜSA und geringer Energiebedarf.	10	Ein- und Ausschalten der BÜSA bei jeder Zugfahrt, dadurch Energiebedarf für Überwachungssignal, Schrankenantriebe, Lz (ggf. vLz) bei jeder Zugfahrt.
Personal	1	Autarke Betriebsweise. Kein Bediener erforderlich.	1	Autarke Betriebsweise. Kein Bediener erforderlich.
<b>Indirekt monetär</b>				
Betriebsstörungen durch zerstörte Schrankenbäume	1	Schrankschließen wird überwacht und verhindert ein Absenken des Schrankenbaums, wenn StVTn im Sektor 2.	6	Bei Rückstau von Fahrzeugen in den Bereich der Schranken, können bei Einschaltung der BÜSA und Absenken der Schrankenbäume diese beschädigt werden.
Betriebsstörungen aufgrund widerrechtlichen Verhaltens der StVTn am BÜ.	1	Aufgrund Schrankenabschluss, ist ein Eindringen gefährdender StVTn in den GF während des gesicherten Zustandes nicht möglich. Der Aufenthalt von StVTn im GF bei sich schließenden Schranken wird durch die GFR ausgeschlossen.	6	Viele Unfälle oder Beinaheunfälle am BÜ, bei denen der Betriebsablauf unterbrochen bzw. verzögert wird, entstehen durch Querungsvorgänge während der aktiven BÜ-Sicherung. Eine physische Barriere oder eine GFR ist hier nicht vorhanden.

Tabelle 6-8: EWA Stufe 1 und 2

Nr.	Bewertungskriterien	Kostenannahme	
		optiBÜSA	H/ÜS
1	Investition	5	11
2	Instandhaltung	4	9
3	Betriebskosten	3	10
4	Personal	1	1
5	Betriebsstörungen durch zerstörte Schrankenbäume	1	6
6	Betriebsstörungen aufgrund widerrechtlichen Verhaltens der StVTn am BÜ	1	6
	Summe	15	43
	Durchschnitt	<b>2,5</b>	<b>7,17</b>

Tabelle 6-9: Zusammenfassung der Kostenannahme

Im direkten Vergleich betragen die Kostenannahmen von optiBÜSA gegenüber H/ÜS etwas weniger als ein Drittel. Dies entspricht in etwa den Angaben über die Kostenaufteilung bei BÜSA, das in Kapitel 4 herausgearbeitet wurde. Dort wird für den Anteil der Straßenbaumaßnahmen an den Gesamtkosten ein Prozentsatz von 39 % angegeben. Bei der Nachrüstung eines bisher mit Anrufschanke ausgerüsteten BÜ mit optiBÜSA werden keine und wenn doch,

dann nur geringe Kosten für den Straßenbau anfallen, weshalb der Wert aus Tabelle 6-9 durchaus realistisch ist. Für das zugrundeliegende Beispiel ist festzustellen, dass die geringe Straßenbreite (vgl. Abbildung 6-3) bei optiBÜSA zu sehr geringen und für H/ÜS zu sehr umfangreichen Straßenbaumaßnahmen (inklusive Abbiegespuren auf der parallel zu den Gleisen verlaufenden Straße) führen wird. Der Bedarf an umfangreichen Baumaßnahmen für die Lösung mit H/ÜS konnte mittels BÜSA-Leitfaden ermittelt werden.

Aufgrund fehlender Geldwerte werden für die weiteren Betrachtungen nicht monetäre Bewertungskriterien (siehe Tabelle 6-10) eingeführt. Dadurch wird ein objektiver Vergleich der Nutzwerte möglich.

Nr.	Bewertungskriterien
	Nicht monetär
7	Sicherheitsempfinden der StVTn
8	Hohe Funktionalität der eingesetzten Technologie
9	Kurze Schließzeiten der Schranken
10	Anhalten des parallelen Bundesstraßenverkehrs

Tabelle 6-10: Nicht monetäre Bewertungskriterien

### Stufe 3

In Tabelle 6-11 wird das Ergebnis des paarweisen Vergleichs dargestellt, das schließlich für die Berechnung des Nutzwertes benötigt wird.

	Investition	Instandhaltung	Betriebskosten	Personal	Betriebsstörungen durch zerstörte Schrankenbäume	Betriebsstörungen aufgrund widerrechtlichen Verhaltens der Straßenverkehrsteilnehmer	Sicherheitsempfinden der Straßenverkehrsteilnehmer	Hohe Funktionalität der eingesetzten Technologie	Kurze Schließzeiten der Schranken	Anhalten des parallelen Bundesstraßenverkehrs	Summe	Gewichtung [%]
Investition		2	3	2	4	3	4	3	3	3	27	15,00
Instandhaltung	2		2	1	2	1	3	3	2	2	18	10,00
Betriebskosten	1	2		2	3	3	3	3	3	3	23	12,78
Personal	2	3	2		3	3	3	3	3	3	25	13,89
Betriebsstörungen durch zerstörte Schrankenbäume	0	2	1	1		2	3	2	3	3	17	9,44
Betriebsstörungen aufgrund widerrechtlichen Verhaltens der Straßenverkehrsteilnehmer	1	3	1	1	2		3	2	1	3	17	9,44
Sicherheitsempfinden der Straßenverkehrsteilnehmer	0	1	1	1	1	1		1	1	2	9	5,00
Hohe Funktionalität der eingesetzten Technologie	1	1	1	1	2	2	3		2	3	16	8,89
Kurze Schließzeiten der Schranken	1	2	1	1	1	3	3	2		3	17	9,44
Anhalten des parallelen Bundesstraßenverkehrs	1	2	1	1	1	1	2	1	1		11	6,11
											<b>180</b>	<b>100,00</b>

Tabelle 6-11: Ergebnis des paarweisen Vergleichs

### Bestimmung der Zielerträge und Zuordnung der Zielwerte

Die Tabelle 6-12 zeigt die Zielwerte bzw. die Kriterienerfüllung der beiden Sicherungsmaßnahmen, wie beispielsweise die Festlegung der Zielwerte des Kriteriums 6 (Betriebsstörungen aufgrund von Unfällen am Bahnübergang). Die Sicherung durch Halbschranken wird durch ihre physikalischen Barrieren gewährleistet. Da diese jedoch umfahren werden können und bei dieser Sicherung keine GFR eingesetzt wird, stellt dies einen geringeren Nutzen dar, bezogen auf das Kriterium 6, als optiBÜSA, da hier die Sicherung mit Schranken erfolgt. Eine Studie im Auftrag der Continental AG [ES06] hat ergeben, dass sich die Verkehrsteilnehmer bei der Querung eines BÜ mit Schranken sehr sicher und bei der Querung eines BÜ mit Halbschranken relativ sicher fühlen. Da optiBÜSA über eine Schrankenanlage mit Gefahrraumüberwachung und zusätzlich dazu Rückstauerkennung verfügt, wird in dieser Arbeit davon ausgegangen, dass dieses Sicherheitsempfinden auf optiBÜSA übertragbar ist.

Nr.	Bewertungskriterien	optiBÜSA		H/ÜS	
		Zielwert / Kriterienerfüllung	Begründung	Zielwert / Kriterienerfüllung	Begründung
1	Investition	8	Geringe Kosten für Straßenbau. Zusatzkosten für GFR mit optischem System geringer als Radar-GFR.	3	Hier wird u.U. ein umfangreiches Straßenbauprogramm erforderlich mit Installation von vLz. Jedoch keine GFR erforderlich.
2	Instandhaltung	6	Die Instandhaltung kann geringer ggü. anderen BÜSA eingestuft werden, da ein geringerer Verschleiß zu erwarten ist.	5	Die Instandhaltung wird durchschnittlich/normal bewertet.
3	Betriebskosten	7	Wenige Betriebsstunden, da Schranken nur für Querungsfall zu öffnen sind. ÜS bedingt jedoch eine Aktivierung des Überwachungssignals je Zugfahrt.	2	Die BÜSA wird mit ihrer vollen Funktionalität bei jeder Zugfahrt eingeschaltet.
4	Personal	9	Nur zu Diagnosezwecken	9	Nur zu Diagnosezwecken
5	Betriebsstörungen durch zerstörte Schrankenbäume	10	Das optische System minimiert diesen Fall gegen Null.	5	Hier wird ein durchschnittlicher Wert angenommen, da dies häufig vorkommt.
6	Betriebsstörungen aufgrund widerrechtlichen Verhaltens der Straßenverkehrsteilnehmer am Bahnübergang.	10	Durch Stereo-Kamera-GFR und Schranken mit vollem Straßenabschluss ist dieser Fall hier nicht anzunehmen.	5	Hier wird ein durchschnittlicher Wert angenommen, da dies häufig vorkommt.
7	Sicherheitsempfinden der Straßenverkehrsteilnehmer	10	Verkehrsteilnehmer fühlen sich bei der Querung eines Bahnübergang mit Schranken sehr sicher [ES06]	8	Verkehrsteilnehmer fühlen sich bei der Querung eines Bahnübergang mit Halbschranken relativ sicher [ES06]
8	Hohe Funktionalität der eingesetzten Technologie	8	Das optische System verspricht ggf. eine Vielzahl von Funktionen (z.B. Rückstaudetektor)	2	Keine hohe Funktionalität der Komponenten. Stand der Technik.
9	Kurze Schließzeiten der Schranken	1	Das Wirkprinzip der bedarfsgesteuerten Schranke ist entgegengesetzt zu den herkömmlichen Sicherungsarten und bietet keine kurzen Schließzeiten.	7	Mit der Überwachungsart ÜS sind kürze Schließzeiten möglich, jedoch nicht die kürzesten (z.B. im Vergleich zu Fü)
10	Anhalten des parallelen Bundesstraßenverkehrs	10	Mit dem Einsatz des optischen System wird die Rückstauerkennung umgesetzt, weshalb keine vorgelagerten Lichtzeichen eingesetzt werden müssen.	1	Die Bundesstraßenverkehr wird bei jeder Zugfahrt über die vorgelagerten Lichtzeichen angehalten.

Tabelle 6-12: Ergebnis der Zielwertberechnung

### Berechnung der Nutzwerte

Zur Bestimmung des Nutzwertes gilt folgende Formel (siehe Formel 6.1):

$$Nx = \sum_j [gj \times n(kj)]; j = 1,2,...m \quad (6.1)$$

Der Nutzwert  $N$  einer Systemvariante  $x$  ergibt sich dabei aus der Summe der jeweiligen Kriteriengewichte  $gj$  multipliziert mit den Zielwerten  $n(kj)$  für  $m$  Zielkriterien [Zan93]. Für die Berechnung werden die 100 % der Gewichtung mit 1 angenommen und die Ergebnisse entsprechend verteilt. Der maximale Zielwert beträgt demnach 120 (bei 12 Bewertungskriterien und der jeweiligen höchsten Wertung von 10 Punkten). Die Summe der Ergebnisse kann ma-

ximal 10 Punkte betragen, von denen für das zugrundeliegende Fallbeispiel die Variante H/ÜS 4,7 Punkte und die Variante optiBÜSA 7,75 Punkte erreicht (vgl. Tabelle 6-13). Dies bedeutet, dass optiBÜSA, bezogen auf das Fallbeispiel, einen höheren Nutzwert gegenüber H/ÜS hat.

Nr.	Bewertungskriterien	optiBÜSA			H/ÜS		
		Zielwert	Gewichtung [%]	Ergebnis	Zielwert	Gewichtung [%]	Ergebnis
1	Investition	8	15,00	1,20	3	15,00	0,45
2	Instandhaltung	6	10,00	0,60	5	10,00	0,50
3	Betriebskosten	7	12,78	0,89	2	12,78	0,26
4	Personal	9	13,89	1,25	9	13,89	1,25
5	Betriebsstörungen durch zerstörte Schrankenbäume	10	9,44	0,94	5	9,44	0,47
6	Betriebsstörungen aufgrund widerrechtlichen Verhaltens der Straßenverkehrsteilnehmer	10	9,44	0,94	5	9,44	0,47
7	Sicherheitsempfinden der Straßenverkehrs-teilnehmer	10	5,00	0,50	8	5,00	0,40
8	Hohe Funktionalität der eingesetzten Technologie	8	8,89	0,71	2	8,89	0,18
9	Kurze Schließzeiten der Schranken	1	9,44	0,09	7	9,44	0,66
10	Anhalten des parallelen Bundesstraßenverkehrs	10	6,12	0,61	1	6,12	0,06
Summe		79	100,00	7,75	47	100,00	4,70

Tabelle 6-13: Ergebnis Nutzwert

### Ergebnis der Analyse

In der Abbildung 6-6 werden die Ergebnisse der Stufen eins bis drei für die bei dem Fallbeispiel bewerteten Sicherungen H/ÜS (Nutzwert: 4,7; Kostenannahme: 7,17) und optiBÜSA (Nutzwert: 7,75; Kostenannahme: 2,5) aufgetragen.

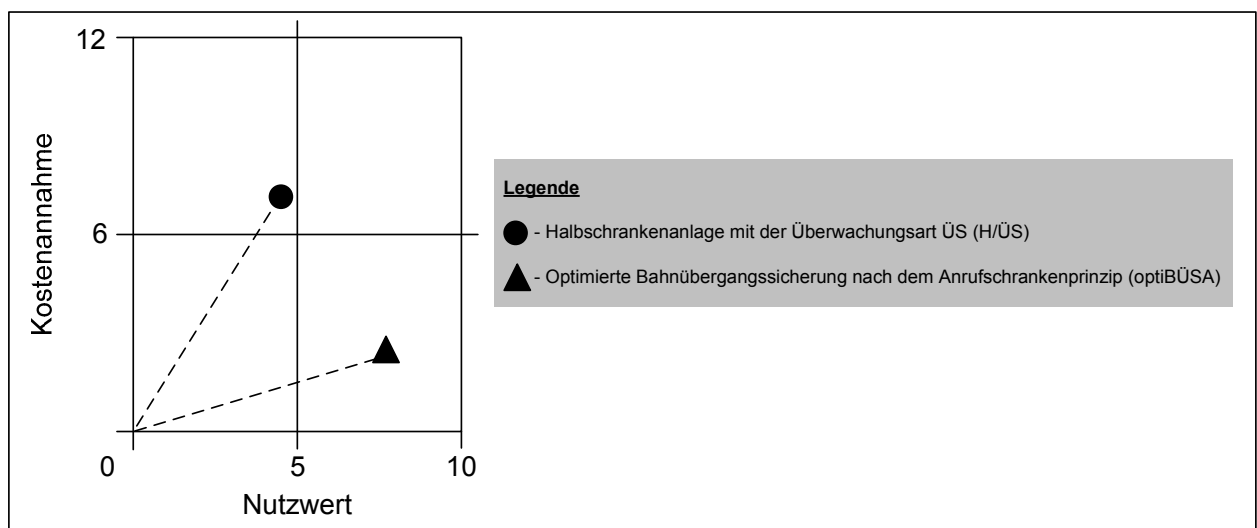


Abbildung 6-6: Ergebnis der EWA für das Fallbeispiel

Das Ergebnis zeigt, dass optiBÜSA für das betrachtete Fallbeispiel, im Vergleich zu einer Halbschrankenanlage mit Überwachungssignal, bei einer geringer zu erwartenden Kostenentwicklung einen höheren Nutzen aus Betreibersicht bietet. Es ist anzunehmen, dass sich das Ergebnis beim Einsatz von Realkosten zwar verschiebt, die Tendenz im direkten Vergleich zwischen optiBÜSA und H/ÜS jedoch erhalten bleibt. Selbst wenn einzelne Punkte anders gewertet werden, resultiert bei dieser Berechnungsmethode keine grundlegend anderen Einschätzungen.



## 6.4 Fazit

Der Fokus der Systemoptimierung lag auf der Identifikation einer Nutzensteigerung durch eine Automatisierung des Sicherungsverfahrens Anrufschränke einerseits und auf der Ermittlung von Möglichkeiten zur Absenkung der spezifischen BÜSA-Kosten andererseits. Dieses wird mit der Automatisierung der Grundfunktionen der Anrufschränke, der damit verbundenen Reduktion von Straßenbaukosten und der Konzeption einer neuen GFR erreicht. Mit der strukturierten Vorgehensweise, die durch die Methode zur Auswahl optimierter Bahnübergangssicherungsanlagen vorgegeben wurde, sind die mit optiBÜSA erreichbaren Vorteile von bedarfsgesteuerten Schranken gegenüber anderen BÜSA aufgezeigt worden. Im Vergleich mit den heutigen Ablösestrategien konnte das Kostensenkungspotenzial ermittelt und der Handlungsbedarf für ein automatisiertes Sicherungskonzept nach dem Anruschrankenprinzip systematisiert hergeleitet werden. Mit optiBÜSA ist eine geeignete Optimierungsstrategie zur adäquaten Ablösung von Anrufschränken wissenschaftlich ermittelt und bewertet worden.

OptiBÜSA ermöglicht eine Optimierung des gesamten Bestands bedarfsgesteuerter Schranken und nicht nur für die noch etwa 1000 Anrufschränke in Deutschland. Darüber hinaus wird mit der Beschreibung eines neuen Technologiekonzepts die Umsetzung weiterer Funktionen im Bahnbereich in Aussicht gestellt, mit denen auch bei bestehenden BÜSA-Konzepten potenziell die Kosten reduziert werden können. Hierzu zählen vor allem die Funktion der Rückstauerkennung und die Stereo-Kamera-GFR als Ersatz der Radar-GFR. Dadurch steigt der Nutzen des Konzepts und rechtfertigt die zusätzlichen Aufwendungen für die Entwicklung der neuen Bahntechnologie. Die höhere Zahl von Anwendungen für ein optisches System gegenüber der Anzahl allein für Anrufschränkanwendungen ist ein wesentlicher Anreiz für eine Entwicklung, um hier ein marktfähiges Produkt zu etablieren.

Die durchgeführte Bewertung des Systemkonzepts belegt die Vorteilhaftigkeit der Automatisierung bedarfsgesteuerter Bahnübergangssicherungen nach dem Anrufschränkenprinzip. Die Erfüllung der betrieblichen, sicherungstechnischen und wirtschaftlichen Anforderungen durch optiBÜSA, das mit der AOB verifiziert wurde, führen zu einem hohen Nutzwert dieses Anlagentyps. Die Bedarfsgesteuertheit und die erweiterten Sicherheitsfunktionen erweisen sich dabei als großer Vorteil bei der Ablösung von Anrufschränken gegenüber den heute gängigen Ablösekonzerten. Das Sicherungskonzept beschreibt die Anforderungen an ein neues Technologiekonzept und zeigt damit einen Weg auf, wie ein Stereo-Kamera-System zur Zulassung für den Einsatz im Bahnbereich gestaltet werden muss. Dies ermöglicht die Einführung einer neuen Bahntechnologie über die Schritte nichtsicherheitskritischer Anwendungen (Bedarfserkennung) bis zur sicherheitskritischen Gefahrenraumüberwachung. Die Abbildung 6-8 verdeutlicht zusammenfassend das Ergebnis der Systemoptimierung.

Abschließend ist festzustellen: Mit dem Ergebnis dieser Arbeit ist optiBÜSA theoretisch realisiert und zur Umsetzung in der Praxis fehlen nur wenige weitere Schritte. Was fehlt, sind umfangreiche Demonstratorstudien, die vor allem Langzeitmessungen unter verschiedenen Witterungsbedingungen und betrieblichen Besonderheiten beinhalten müssen. Hierfür muss die Bildverarbeitungssoftware entwickelt und das System an einem Bahnübergang installiert werden. Diese Aufgabe würde jedoch den Rahmen dieser Arbeit deutlich sprengen.

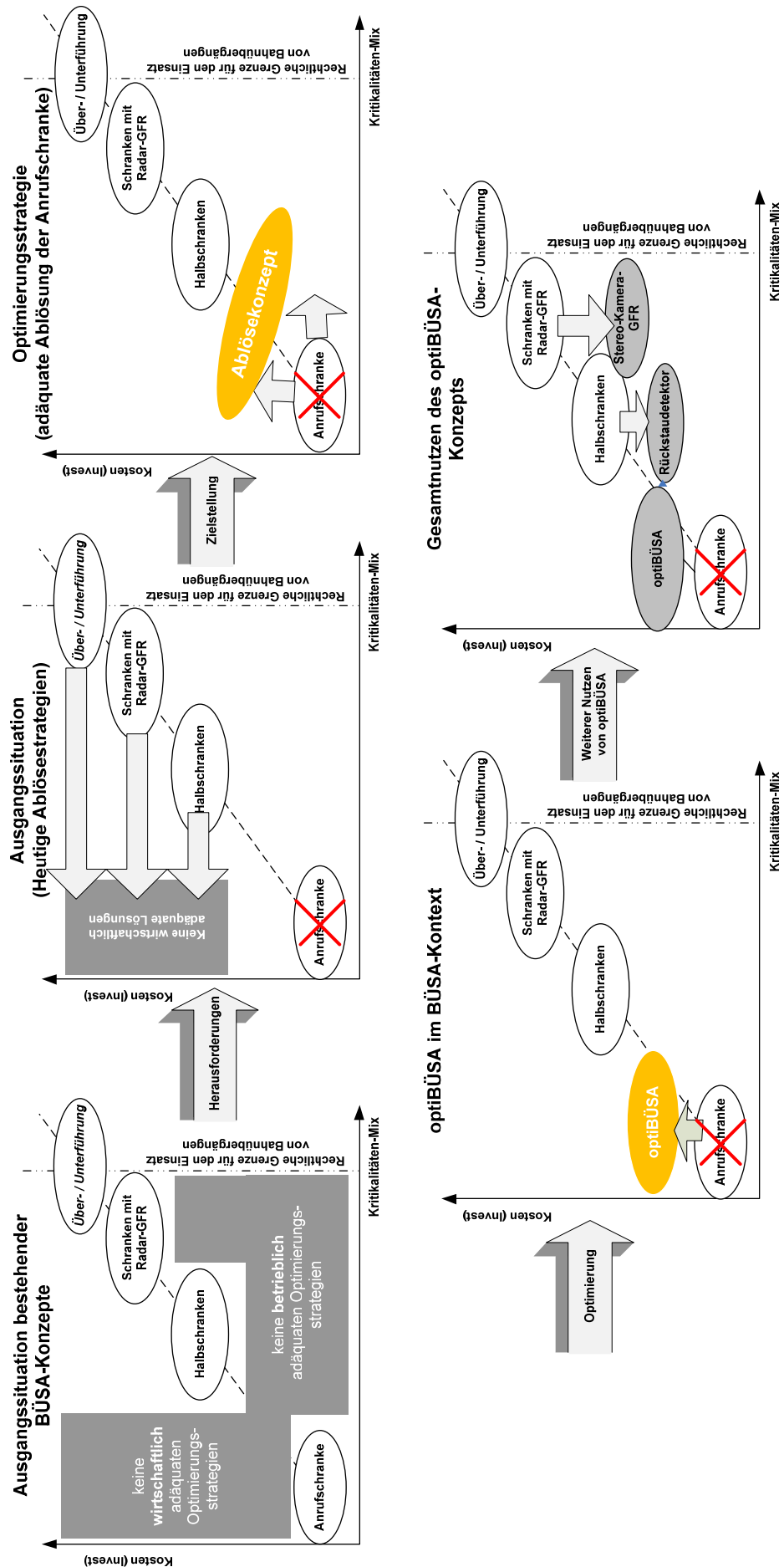


Abbildung 6-7: Übersicht zum Ergebnis der Systemoptimierung



## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Das Eisenbahnsystem wurde durch eine stetige Weiterentwicklung geprägt, die eine deutliche Steigerung der Systemsicherheit bewirkt hat. Dies ist u.a. darin begründet, dass der Mensch bei der Umsetzung sicherheitskritischer Funktionen von technischen Systemen unterstützt wird bzw. durch diese ersetzt wurde. Auch zukünftig werden deshalb intelligente Technologien und leistungsstarke Sicherungsverfahren benötigt, die eine hohe Sicherheit ermöglichen und darüber hinaus zu einer verbesserten Wirtschaftlichkeit sowie höheren Leistungsfähigkeit der Schieneninfrastruktur beitragen. Im Bereich der Bahnübergangssicherung besteht diesbezüglich schon heute ein hoher Bedarf. Dem entgegen ist festzustellen, dass aufgrund langwieriger Zulassungsprozesse und hoher Entwicklungskosten und auf der anderen Seite nur geringen Absatzzahlen, in den letzten Jahren nur wenige nennenswerte Entwicklungsschübe im Kontext von Bahnübergangssicherungsanlagen zu verzeichnen gewesen sind. Die Entwicklung neuer betrieblicher Verfahren und ganzheitlicher Konzepte ist die Grundlage, um auch zukünftig eine geeignete Bahnübergangssicherung gewährleisten zu können und den Alttechnikbestand adäquat abzulösen. Insbesondere zur Senkung der Kosten in den Bereichen der Baumaßnahmen und Technik sowie zur Bereitstellung betrieblich-wirtschaftlich optimaler Anlagen bedarf es zunehmend adäquater Optimierungsstrategien.

Ein hoher Bedarf besteht dort beispielsweise bei der Sicherung des Gefahrenraums. Eine weitere Herausforderung ist die Automatisierung von bedarfsgesteuerten Sicherungsverfahren. Diese Arbeit beschreibt hierfür erstmals eine Optimierungsstrategie.

Das vorgestellte Konzept optiBÜSA – optimierte Bahnübergangssicherung nach dem Anrufschrankenprinzip – beinhaltet eine Migrationsstrategie zur Einführung einer neuen Technologie zur Gefahrenraumfreimeldung. Für den Anwendungsfall Anrufschrankenautomatisierung wurden die Randbedingungen zum Einsatz eines Stereo-Kamera-Systems eruiert und spezifiziert. Dieses Technologiekonzept ermöglicht ein funktionales Systemdesign und unterstützt die Bestrebungen, die Grundfunktionen bedarfsgesteuerter Schranken zu automatisieren.

Der in dieser Arbeit vorgestellte Ansatz wurde öffentlich diskutiert und verifiziert (siehe [PEM07], [Pel09], [PGM\*08], [Pel08a], [EHP08]). OptiBÜSA wurde dort als eine erfolgsversprechende Lösung wahrgenommen, mit welcher die Herausforderungen im Zusammenhang mit der Ablösung von Anrufschranken betrieblich-wirtschaftlich adäquat zu bewältigen sind.

Zur Bewertung neuer BÜSA-Konzepte ist durch die Arbeit erstmals eine Methode – „Auswahl optimierter Bahnübergangssicherungsanlagen“ (AOB) – eingeführt worden. Das Ziel dieser Methode ist die Systematisierung der Entscheidungsprozesse zur Wahl einer adäquaten Verbesserung aus strategischer und aus bahnübergangsspezifischer Sicht. Mit Hilfe der AOB können in der Vorphase einer Entwicklung geeignete Optimierungsstrategien identifiziert und das Vorgehen zur Bewertung dieser strukturiert werden. Dabei kommen Instrumente zur Überprüfung der Sicherheit, der Wirtschaftlichkeit und der betrieblichen Eignung zum Einsatz. Die Bewertungsergebnisse gegebenenfalls nicht transformierbarer Ziele werden in einen Gesamtnutzen kumuliert. Gemeinsam bilden diese Kennzahlen eine umfassende Entscheidungsbasis.

Für den Nachweis der betrieblichen Eignung stellt die Arbeit einen BÜSA-Leitfaden vor. Ein weiterer Nutzen dieses Leitfadens ist die Verwendung als Bewertungswerkzeug aus bahnübergangsspezifischer Sicht während der Planung. Mit ihm wird es damit erstmals möglich, in der Planung die betrieblich-wirtschaftlich optimale BÜSA für Bahnübergänge zu bestimmen.

Im Rahmen der Konzeption von optiBÜSA wurden Anforderungen an die Systemgestaltung ermittelt und Lösungswege für die Weiterentwicklung des Konzeptes aufgezeigt. Mit optiBÜSA wird ein System beschrieben, durch welches die automatische Bedarfserkennung, die Rückstauerkennung und eine Gefahrenraumüberwachung speziell für bedarfsgesteuerte Schranken umgesetzt werden soll. Für das Sicherungskonzept wurde der Januskopfalgorithmus entwickelt. Für das Technologiekonzept wurde ein Stereo-Kamera-System des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. genutzt, das bereits für Forschungsaufgaben im Bahnbereich vorkonzipiert (Hardware und Software zur Erstellung einer 3D-Tiefenkarte) ist. Die optiBÜSA-Logik des Januskopfalgorithmus ist als Anforderungskatalog an die, diesem System hinzuzufügende, Hinderniserkennung zu verstehen.

Ein Ziel der Arbeit war es den Einsatz bahnfremder Technologien am Beispiel von Stereo-Kamera-Systemen zu motivieren und eine Möglichkeit der geeigneten Einführung am Beispiel von optiBÜSA zu zeigen. Die prinzipielle Eignung konnte mit der Methode AOB wissenschaftlich strukturiert nachgewiesen werden. Die Umsetzung von optiBÜSA ist innerhalb dieser Arbeit somit theoretisch erfolgt. Der Beweis der Praxistauglichkeit wird nach Fertigstellung der Bildverarbeitung erfolgen können.

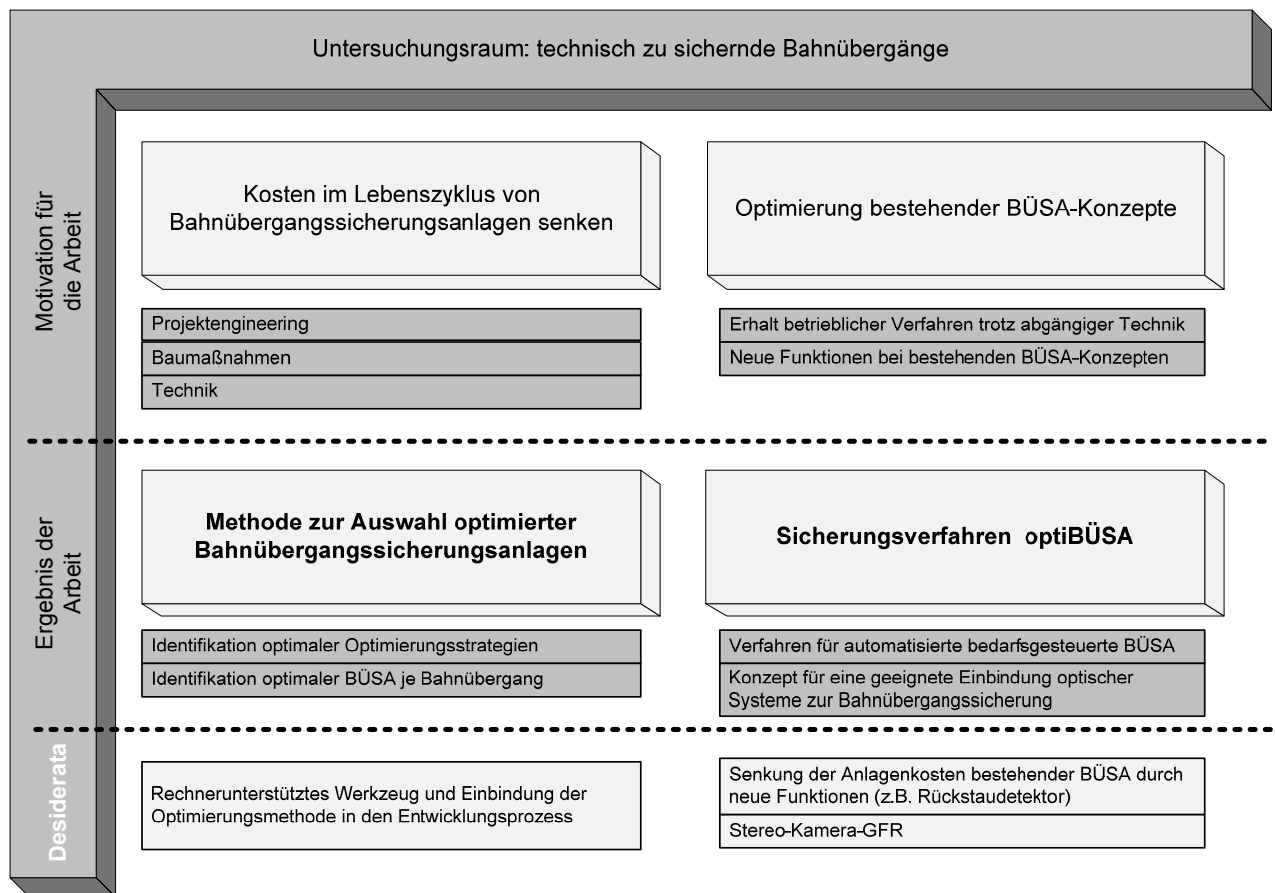
Insgesamt wird ein Beitrag zur Senkung der Lebenszykluskosten von BÜSA-Konzepten geliefert, die zur Ablösung der Anrufschränke bereitstehen. Dies wird durch die Reduktion der Kosten im Bereich des Projektengineering (mittels AOB), des Straßenbaus (durch den betrieblichen Erhalt der Anrufschränkenfunktionen) und bei der Technik (Stereo-Kamera-GFR für bedarfsgesteuerte BÜSA) erreicht, wodurch die Ergebnisse indirekt zu einem höheren Anteil technisch gesicherter Bahnübergänge führen werden. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die vorliegende Arbeit unmittelbar auf eine Optimierung des Konzeptionsprozesses abzielt und einen geeigneten Weg zur Optimierung der Bahnübergangssicherung für bedarfsgesteuerte Schranken aufzeigt.

### **Ausblick**

Mit den in der Arbeit erzielten Ergebnissen wurden Möglichkeiten aufgezeigt, wie zukünftig die Kosten im Lebenszyklus von BÜSA gesenkt werden können. Es bleibt weiterführenden Arbeiten vorbehalten, anhand der vorgelegten Ergebnisse vertiefend zu arbeiten (vgl. Abbildung 7-1). Insbesondere wäre ein rechnerunterstütztes Werkzeug zur Einbindung der AOB in die bestehende Entwicklungsumgebung der Betreiber und Hersteller zu erstellen, welches erwarten lässt, dass die Kosten sowohl der Technik als auch der Planung reduziert werden.

Mit der Arbeit wurde weiterhin die Entwicklung einer neuen GFR-Technologie vorbereitet. Jetzt gilt es, die Technologie für den Einsatz am Bahnübergang umzugestalten und weiterzuentwickeln. Für weitere Arbeiten ist es sinnvoll, die Software für die Erstellung der 3D-Karte um eine Bildauswertung zur Interpretation der Szene weiterzuentwickeln. Als Basis kann sinnvoller Weise der beschriebene Januskopfalgorithmus verwendet werden. Danach kann eine Validation des Systems optiBÜSA anhand eines Demonstrators, der im Betrieb eingesetzt wird,

erfolgen. Darauf aufbauend wird das endgültige Systemdesign beschreibbar und eine Bewertung der Wirtschaftlichkeit anhand der Realkosten von optiBÜSA durchführbar.



**Abbildung 7-1: Übersicht zum Ergebnis und zur Desiderata**

Abschließend kann festgestellt werden, dass trotz überschaubarer Anzahl von Funktionen an einem Bahnübergang gerade hier ein hoher Optimierungsbedarf besteht und die Möglichkeit zur effizienten Gestaltung nicht ohne den Einsatz ganzheitlicher Konzepte unter Berücksichtigung neuer Funktionen, Methoden, Sicherungsverfahren und Technologien sowie Einbindung des Menschen erfolgen kann. Darüber hinaus sind derzeit über die Hälfte der Bahnübergänge in Deutschland nichttechnisch gesichert, viele davon aufgrund des hohen Investitionsbedarfs für Bahnübergangssicherungsanlagen. Von daher besteht weiterhin ein hoher Optimierungsbedarf zur Reduktion dieser Kosten, der nur durch weitere wissenschaftliche und industrielle Arbeiten im Forschungsfeld Bahnübergang beseitigt werden kann.



# Abkürzungsverzeichnis

3D	dreidimensional
AEG	Allgemeines Eisenbahngesetz
AK	Ausschaltkontakt
ALz	Andreaskreuz mit Lichtzeichen
AOB	Methode zur Auswahl optimierter Bahnübergangssicherungsanlagen
Automatik-HET	automatisch wirkende Hilfseinschalttaste
BÜ	Bahnübergang
BÜSA	Bahnübergangssicherungsanlagen
Bü0	Signalbegriff: „Halt vor dem BÜ! Weiterfahrt nach Sicherung“
Bü1	Signalbegriff: „Der BÜ darf befahren werden“
Bü2	Signalbegriff, welches das Überwachungssignal ankündigt und den Ort des Einschaltpunktes markiert
BÜV-NE	Bahnübergangsvorschrift für nichtbundeseigene Eisenbahnen
DB AG	Deutsche Bahn Aktiengesellschaft
CCTV	Closed Circuit Television
CCD	Charge Coupled Device
CENELEC	Europäisches Komitee für elektrotechnische Normung
cm	Zentimeter
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
COTS	Commercial-off-the-shelf
d	Sperrstrecke
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
EBA	Eisenbahn-Bundesamt
EBO	Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung
ECORail	EGNOS Controlled Railway Equipment
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service



EIU	Eisenbahninfrastrukturunternehmen
EK	Einschaltkontakt
EK 80	EK bei $v_{Tfz} = 80$ km/h
EK 100	EK bei $v_{Tfz} = 100$ km/h
EK 120	EK bei $v_{Tfz} = 120$ km/h
EKrG	Eisenbahn Kreuzungsgesetz
ESTW	Elektronisches Stellwerk
ET	Einschalttaste
ETCS	European Train Control System
EVU	Eisenbahnverkehrsunternehmen
EWA	Erweiterte Wirtschaftlichkeitsanalyse
Fdl	Fahrdienstleiter
FPGA	Field Programmable Gate Arrays
FSB	Funktionale Systembetrachtung
Fü	Überwachungsart Fernüberwachung
GF	Gefahrenraum
GFR	Technische Gefahrenraumfreimeldeeinrichtung
GPS	Global Positioning System
h	Höhe
H	Kurzbezeichnung für die Halbschrankenanlage
HET	Hilfseinschalttaste
HH	Kurzbezeichnung für die Schrankenanlage mit vollem Abschluss, bestehend aus zwei Halbschranken
H/ÜS	Halbschrankenanlage mit Lichtzeichen und Überwachungsart ÜS
H+Lz	Halbschrankenanlage mit Lichtzeichen
Hp	Überwachungsart mit Hauptsignal (Signalgesteuerte Überwachung)
INRETS	Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité
ITS	Institut für Verkehrssystemtechnik

Kfz	Kraftfahrzeug
KOMPAS	Komponenten Automatisierter Schienenverkehr
Laser	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LCC	Life Cycle Costs (Lebenszykluskosten)
Lidar	Light Detection and Ranging
Lkw	Lastkraftwagen
$l_{st}$	Länge Straßenfahrzeug
LST	Eisenbahnleit- und -sicherungstechnik
Lz	Lichtzeichen
m	Meter
optiBÜSA	optimierte Bahnübergangssicherung nach dem Anrufschrakenprinzip
öV	öffentlicher Verkehr
R	Richtung
Radar	Radio Detection and Ranging
RailSiTe	Rail Simulation and Testing (eisenbahntechnisches Labor des DLR)
RAS	Richtlinie für die Anlage von Straßen
RAMS	Reliability Availability Maintainability Safety
RCAS	Railway Collision Avoidance System
Ril	Richtlinie
RS	Rangierschalter
$s_{br}$	Bremsweg
$s_e$	Einschaltstrecke
SELCAT	Safer European Level Crossing Appraisal Technology
SIL	Safety Integrity Level
SiS	Sicherheitsschichten
SK	Stereo-Kamera
SK-GFR	Stereo-Kamera-Gefahrenraumfreimeldeeinrichtung
$s_r$	Räumstrecke

$S_{r, F}$	Räumstrecke Fußgänger
SRS	System Requirements Specification
StA	Straßenabschnitt
StVTn	Straßenverkehrsteilnehmer
StVO	Straßenverkehrsordnung
$S_{WP}$	Strecke Nicht-Öffnen-Kriterium
t	Zeit
$t_B$	Bedienzeit
Tf	Triebfahrzeugführer
$t_G$	Gelbzeit
$t_{GF}$	Zeit für die Durchführung einer Gefahrenraumüberwachung
$t_l$	Vorleuchtzeit
$t_o$	Schrankenöffnungszeit
$t_{Quer}$	BÜ-Querungszeit Straße
$t_r$	Räumzeit
$t_{r, F}$	Räumzeit Fußgänger
$t_{r, Kfz}$	Räumzeit Straßenfahrzeug
$t_s$	Schrankenschließzeit
$t_{Tf}$	Signalsichtzeit des Lokführers
$t_{WP}$	Sperrzeit für Nicht-Öffnen-Kriterium
Üs	Überwachungssignal
ÜS	Überwachungsart Überwachungssignal
ÜS <sub>OE</sub>	Überwachungsart Überwachungssignal mit optimiertem Einschaltpunkt
UT	Unwirksamkeitstaste
UWC	User Worked Crossing (without telephones)
UWC-MWL	User Worked Crossing with Miniature Warning Lights
UWC-T	User Worked Crossing with Telephones
V	Kurzbezeichnung für Schranken

V(A)	Bezeichnung für die Anrufschränke
vLz	vorgeschaltete Lichtzeichen
V-Modell	Vorgehensmodell
$v_{St, Kfz}$	Räumgeschwindigkeit Straßenfahrzeug
$v_{St, F}$	Räumgeschwindigkeit Fußgänger
$v_{Tfz}$	Geschwindigkeit Schiene
VwV	Verwaltungsvorschriften
WP	Wirkpunkt
WP 80	WP bei $v_{Tfz} = 80 \text{ km/h}$
WP 100	WP bei $v_{Tfz} = 100 \text{ km/h}$
WP 120	WP bei $v_{Tfz} = 120 \text{ km/h}$
Zg2	Signalbegriff für das Zugschlussignal



# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Einteilung der Bahnübergangssicherung nach Kritikalitäten	1
Abbildung 1-2: Erneuerungsbedarf bei BÜSA (nach [Bus07])	2
Abbildung 1-3: Zusammenhang von Zielsetzung und Nutzen der vorliegenden Arbeit	3
Abbildung 1-4: Bereiche im BÜSA-Kontext mit Optimierungspotenzial	4
Abbildung 1-5: Prozess bei abgängiger BÜ-Sicherung im Netz der DB AG (nach [BPA09])	5
Abbildung 1-6: Sichtweisen auf die Gestaltung von BÜSA	6
Abbildung 1-7: V-Modell zum Entwicklungsprozess (nach [CEN99])	7
Abbildung 1-8: Struktur der Arbeit	10
Abbildung 2-1: Generische Darstellung von Sicherheitskonzepten	11
Abbildung 2-2: Gefahrenraum - der Gefahrenpunkt am Bahnübergang	12
Abbildung 2-3: Anrufschränke im Kontext der BÜ-Sicherung	15
Abbildung 2-4: Bahnübergang mit Anrufschränke	15
Abbildung 2-5: Versuchsaufbau für das Stereo-Kamera-System des DLR-Projekts RCAS	22
Abbildung 3-1: Spannungsfeld der Anforderungen bei BÜSA	23
Abbildung 3-2: Systematik des Entscheidungsprozesses	24
Abbildung 3-3: Einsatzbereich der FMEA in der Konzeptphase	26
Abbildung 3-4: Finanzanalytische Wirtschaftlichkeitsrechnung	28
Abbildung 3-5: Ablauf der Nutzwertanalyse der Stufe 3	28
Abbildung 3-6: Punkteskala für den paarweisen Vergleich	29
Abbildung 3-7: Struktur der Matrix des paarweisen Vergleichs	29
Abbildung 3-8: Struktur der Matrix zur Ermittlung des Nutzwertes	29
Abbildung 3-9: Auswahl der betrieblich-wirtschaftlich optimalen BÜSA in der Planung	30
Abbildung 3-10: Prozessmodell für die Planung mit Unterstützung des BÜSA-Leitfadens	38
Abbildung 3-11: Prozessmodell der Bedarfsanalyse	39
Abbildung 3-12: Beispiel eines morphologischen Kastens im Bereich BÜSA	40
Abbildung 3-13: Prinzipskizze des Vorgehens in Teilschritt 1.3	41
Abbildung 3-14: Prozessmodell der systematisierten Optimierung	42
Abbildung 3-15: Struktur des Schemas zur systematischen Ermittlung der Kostentreiber	43
Abbildung 3-16: Struktur des Schemas zur Ermittlung der Kostensenkungspotenziale	44
Abbildung 3-17: Struktur der Matrix zur Auswahl des Optimierungspfads	44
Abbildung 3-18: Struktur der Portfoliodarstellung zur Auswahl eines Lösungsansatzes	45
Abbildung 3-19: Ablauf der methodisch unterstützten Bewertung von BÜSA-Konzepten	46
Abbildung 3-20: Vereinfachte Darstellung der Defizite und resultierender Anforderungen	47

Abbildung 3-21: Einordnung der AOB in das V-Modell	48
Abbildung 3-22: Modell der Methode AOB	49
Abbildung 4-1: Untersuchungsgegenstand: Automatisierung der Anrufschränke	52
Abbildung 4-2: Spektrum der Systemanforderungen	54
Abbildung 4-3: Herausforderung der Ausgangssituation	57
Abbildung 4-4: Angenommene Kostenanalogie bei BÜSA-Technologie	60
Abbildung 4-5: Kostensenkungspotenzial bei GFR	61
Abbildung 4-6: Fragestellung nach der Übertragbarkeit von Komponenten	61
Abbildung 4-7: Bewertung von Technologien zur Hinderniserkennung (nach [Art06])	62
Abbildung 4-8: Mögliche Fehlinterpretationen bei Mono-Kameras (nach [MDD07])	63
Abbildung 4-9: Tiefenbild (3D-Karte) einer Stereo-Kamera [Bör10]	64
Abbildung 4-10: Potentielle Anwendungsfelder optischer Systeme im Bahnbereich	66
Abbildung 4-11: Optimierungspfad für die Anrufschränkenautomatisierung	67
Abbildung 4-12: Optimierungsstrategie zur adäquaten Ablösung der Anrufschränke	69
Abbildung 4-13: Potenzieller Gesamtnutzen der optiBÜSA-Technologie	70
Abbildung 5-1: Sektoren für die Zuordnung der Grundfunktionen	71
Abbildung 5-2: Morphologischer Kasten zur Auswahl der Überwachungsart	72
Abbildung 5-3: Berechnung der Wirkpunkte für das Nicht-Öffnen-Kriterium	74
Abbildung 5-4: Prinzipskizze ÜS mit Daten-Bus	75
Abbildung 5-5: Prinzipskizze ÜS mit Funkanrückmelder	76
Abbildung 5-6: Systemarchitektur des optischen Systems aus dem Projekt RCAS [GPB <sup>+</sup> 09]	78
Abbildung 5-7: Anordnung der Stereo-Kameras am Bahnübergang	79
Abbildung 5-8: Januskopf-Anordnung	80
Abbildung 5-9: Prozessablauf des Bildverarbeitungskonzepts für optiBÜSA	81
Abbildung 5-10: Sektorbezogene Auswertung einer Szene	82
Abbildung 5-11: Ziel der Differenzbild-Analyse	83
Abbildung 5-12: Ausrüstungsbestandteile des Funktionsdemonstrators	84
Abbildung 5-13: Aufbau des Funktionsdemonstrators am Anrufschränkenbahnübergang	85
Abbildung 5-14: Beschreibung der Szene am Anrufschränkenbahnübergang	85
Abbildung 5-15: Beispiel für eine Verdeckungen	86
Abbildung 5-16: Andreaskreuz als Landmarker zur Referenz	87
Abbildung 5-17: Auszug der Messergebnisse mit dem Funktionsdemonstrator	87
Abbildung 5-18: Anordnung der optiBÜSA-Logik in der Systemarchitektur	88
Abbildung 5-19: Bilder für Sequenz des Januskopfalgorithmus	89
Abbildung 5-20: Sequenz des Januskopfalgorithmus	89
Abbildung 5-21: Prinzipskizze der Gefahrenraumüberwachung mit Stereo-Kamera-GFR	90

Abbildung 5-22: Überprüfung der Funktionsfähigkeit des Stereo-Kamera-Systems	93
Abbildung 5-23: Überprüfung der Funktionsfähigkeit des Stereo-Kamera-Systems	93
Abbildung 5-24: Prozessablauf optiBÜSA aus Straßensicht	96
Abbildung 5-25: Prozessablauf optiBÜSA aus Schienensicht	97
Abbildung 5-26: Überblick zu optiBÜSA	101
Abbildung 6-1: Systemarchitektur des Gesamtsystems optiBÜSA	104
Abbildung 6-2: Systemarchitektur Optisches System und Taster	104
Abbildung 6-3: Beispielbahnübergang für eine Sicherung mit optiBÜSA	111
Abbildung 6-4: Ergebnis bei Änderungen am Beispielbahnübergang (Teil A)	111
Abbildung 6-5: Ergebnis bei Änderungen am Beispielbahnübergang (Teil B)	112
Abbildung 6-6: Ergebnis der EWA für das Fallbeispiel	119
Abbildung 6-7: Übersicht zum Ergebnis der Systemoptimierung	121
Abbildung 7-1: Übersicht zum Ergebnis und zur Desiderata	125





# Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Überwachungsarten	13
Tabelle 2-2: Grundfunktionen einer Bahnübergangssicherungsanlage	14
Tabelle 2-3: Einsatzbereiche von Funktionsträgern	14
Tabelle 2-4: Funktionen der Anrufschränke	16
Tabelle 3-1: Teil A – Straßenseitige Kritikalitäten	32
Tabelle 3-2: Teil B – Schienenseitige Kritikalitäten	34
Tabelle 3-3: Teil C – Kosten-Kritikalitäten	35
Tabelle 4-1: Betriebliche Anforderungen	53
Tabelle 4-2: Wirtschaftliche Anforderungen	55
Tabelle 4-3: Kostenblöcke bei BÜSA	58
Tabelle 4-4: Entscheidungsmatrix für die Wahl der geeigneten Technologie	65
Tabelle 5-1: Wirkbereiche der optiBÜSA-Funktionen	72
Tabelle 5-2: Komponenten der BÜ-Sicherung bei optiBÜSA	77
Tabelle 5-3: Verhalten von optiBÜSA in der Rückfallebene	99
Tabelle 5-4: Weitere potentielle Einsatzbereiche des Stereo-Kamera-Systems	100
Tabelle 6-1: Informationen des optischen Systems	105
Tabelle 6-2: Vergleich der Umsetzungen der Funktion bei Anrufschränke und optiBÜSA	108
Tabelle 6-3: Erfüllungsgrad der Sicherungsarten bzgl. der geforderten Eigenschaften	108
Tabelle 6-4: Bestimmung der Ausprägung der straßenseitigen Kriterien von optiBÜSA	109
Tabelle 6-5: Bestimmung der Ausprägung der schienenseitigen Kriterien durch optiBÜSA	110
Tabelle 6-6: Wahl der straßenseitig optimalen Sicherung für das Fallbeispiel	113
Tabelle 6-7: Wahl der optimalen Überwachungsart für das Fallbeispiel	114
Tabelle 6-8: EWA Stufe 1 und 2	116
Tabelle 6-9: Zusammenfassung der Kostenannahme	116
Tabelle 6-10: Nicht monetäre Bewertungskriterien	117
Tabelle 6-11: Ergebnis des paarweisen Vergleichs	117
Tabelle 6-12: Ergebnis der Zielwertberechnung	118
Tabelle 6-13: Ergebnis Nutzwert	119
Tabelle A-1: Mindestanforderung an die Sicherung von Bahnübergängen (nach [DB08a])	153
Tabelle A-2: Vorgehensbeschreibung der Anwendung des BÜSA-Leitfadens	155



## Literaturverzeichnis

- [AEG02] AEG: Allgemeines Eisenbahngesetz. Vom 27.12. 1993, zuletzt geändert durch das zweite Gesetz zur Änderung eisenbahnrechtlicher Vorschriften vom 21.06.2002
- [AL08] Asbrock, Hartwig; Lachmann, Olaf: Solar-Anrückmelder über Funk. Signal+Draht (100), Seiten 36 – 39, Eurailpress, Hamburg, 2008
- [All08] Allmann, Gerd-Dieter: Infrastrukturdatenmanagement – Videoerfassung von Eisenbahnstrecken. In: EI-Eisenbahningenieur, 2008
- [Ape09] Apel, Norbert: Zielarchitektur BÜ inkl. Schnittstelle zum Stellwerk. Vortrag, 6. SafeTRANS Industrial Day, Stuttgart, 2009
- [Art06] Arthur D. Little Ltd. (Hrsg.): Obstacle Detection at Level Crossings. Final Draft Report to Rail Safety & Standards Boards (RSSB), URL: <http://www.adlittle.uk.com/>, 2006
- [Arn87] Arnold, Hans-Jürgen: Eisenbahnsicherungstechnik. Transpress Verlag, Berlin, 1987
- [ART+06] Ausserer, Karin; Risser, Ralf; Turetschek, Christine; Reiss-Enz, Viktoria: Verkehrstelematik – der Mensch und die Maschine. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (bmvit), Österreich, 2006
- [Ben02] Benitez, Domingo: Performance of Remote FPGA-based Coprocessors for Image-Processing Applications. In: Euromicro Symposium on Digital System Design, 2002
- [Bey11] Beyer, Horst-Tilo: Online-Lehrbuch für allgemeine Betriebswirtschaftslehre, Kapitel 5. In: <http://www.economics.phil.uni-erlangen.de/bwl/>, 2011
- [Bit07] Bitsch, Friedemann: Verfahren zur Spezifikation funktionaler Sicherheitsanforderungen für Automatisierungssysteme in Temporallogik. Dissertation, Universität Stuttgart, 2007
- [BMW07] BMWi (Hrsg.): Mobilität und Verkehr - Nachhaltigkeit, Sicherheit und Wettbewerbsfähigkeit durch intelligenten Verkehr. Hrsg. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) Öffentlichkeitsarbeit, Berlin, 2007
- [Bör05] Börner, Anko: Grundlagen der Digitalen Bildverarbeitung. Vorlesung, Fachhochschule Nordhausen, Nordhausen, 2005
- [Bör06] Börner, Anko: Optische Sensoren für Fahrzeuge. VDI-Berichte, Band 1944, Leonberg, 2006
- [Bör10] Börner, Anko: Ergebnisdokumentation im Rahmen des DLR-internen Forschungsprojektes RCAS. DLR-Institut für Robotik und Mechatronik, Berlin, 2010

- [BPA09] Böhmer, Thomas; Pelz, Markus; Asbrock, Hartwig: Method for a structured identification of suitable safety and securing systems for Level Crossings. EDIS, EURO-Zel 2009, Zilina, 2009
- [Bra05] Braband, Jens: Risikoanalysen in der Eisenbahn-Automatisierung. Auflage 1, Eurailpress, Hamburg, 2005
- [Bre01] Brenner, Kai: Optimale Integration von RBÜT und GFR. In: Signal+Draht, Heft 4, 2001
- [Bus07] Busemann, Andreas: Umsetzung der Europäischen Herausforderungen in der Bahnsicherungstechnik - Was sind die Herausforderungen und Antworten des Eisenbahninfrastrukturbetreibers. Vortrag, 7. Internationaler Signal+Draht Kongress, Fulda, 2007
- [Cat11] Catalá Prat, Alvaro: Sensordatenfusion und Bildverarbeitung zur Objekt- und Gefahrenerkennung. Dissertation, TU Braunschweig, 2011
- [CEN96] CENELEC: EN 50126 - Spezifikation und Nachweis der Verlässlichkeit, Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit und Sicherheit (RAMS). Beuth-Verlag, 1996
- [CEN98] CENELEC: EN 50129 - Bahnanwendungen – Sicherheitsrelevante elektronische Systeme für Signaltechnik. Beuth-Verlag, 1998
- [CEN99] CENELEC: EN 50128 - Bahnanwendungen - Software für Eisenbahnsteuerung- und -überwachungssysteme. Beuth-Verlag, 1999
- [Dam10] Dambietz, Harald: Herausforderungen bei der Planung von Bahnübergangssicherungsanlagen bei der Deutsche Bahn AG. "Sicherheit an Bahnübergängen - Stand und Herausforderungen", 16. Veranstaltung der Fachtagungsreihe "Entwicklungen des Sicherungswesens in Theorie und Praxis", Dresden, 2010
- [DB02] Deutsche Bahn AG (Hrsg.): Lastenheft - Gefahrenraum-Freimeldung (GFR). München, 2002
- [DB03] Deutsche Bahn AG (Hrsg.): Richtlinie 819 - Signalanlagen planen und vorhalten. Frankfurt am Main, 2003
- [DB08a] Deutsche Bahn AG (Hrsg.): Richtlinie 815 - Bahnübergangsanlagen planen und instandhalten. Frankfurt am Main, 2008
- [DB08b] Deutsche Bahn AG (Hrsg.): Richtlinie 301 - Signalbuch. Frankfurt am Main, 2008
- [DB11] Deutsche Bahn AG (Hrsg.): Lastenheft Bedarfsgesteuerte Bahnübergangssicherungsanlage. voraussichtlich in 2011
- [DIN90] DIN 25448: Ausfalleffektanalyse (Fehler-Möglichkeiten- und –Einfluss-Analyse). Deutsches Institut für Normung (Hrsg.), 1990

- [DIN03] DIN EN 50125-3: Umweltbedingungen für Betriebsmittel, Teil 3: Umweltbedingungen für Signal- und Telekommunikationseinrichtungen. Deutsches Institut für Normung (Hrsg.), 2003
- [EBO06] Bundesministerium für Verkehr (Hrsg.): Eisenbahn- Bau und Betriebsordnung (EBO). Ausgabe 2006
- [EHP08] El Koursi, El Miloudi; Hartwig, Katrin; Pelz, Markus: Technical solution for LC. Vortrag, 3rd SELCAT Workshop - Level Crossing Methodology, Paris, 2008
- [EKG01] Eisenbahn Kreuzungs Gesetz (EKrG): Gesetz über Kreuzungen von Eisenbahnen und Straßen (Ausgabe von 1964). zuletzt geändert durch Art. 236, Version von 2001
- [Eld08] eldor Communication Technologies Ltd. (Hrsg.): C.A.S.A. – Collision Avoidance & Safety Alert – A System for Level Crossing. Produktblatt, URL: [www.eldor-il.com](http://www.eldor-il.com), Israel, 2008
- [End06] Enders, Dirk H.: Sicherung von Bahnübergängen bei der DB Netz AG. In: Deine Bahn, Heft 11, 2006
- [ES06] Ellinghaus, Dieter; Steinbrecher, Jürgen: Das Kreuz mit dem Andreaskreuz - Eine Untersuchung über Konflikte an Bahnübergängen. Continental AG, Hannover, 2006
- [ES07] Eickmann, Carla; Schwartz, Stefanie: CENELEC-konforme Entwicklung von Leit- und Sicherungstechnik für regionale Infrastruktur. EI - Der Eisenbahningenieur, 58 (7/2007), Seiten 6-9. DVV Media Group GmbH | DVV Rail Global. ISSN 0013-2810.
- [ES09] Eickmann, Carla; Schumann, Tilo: Das Projekt "Neue Konzepte für die Betriebsführung regionaler Strecken". Bericht, DLR-TS 1.3, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., ISSN 1866-7213, 2009
- [FG03] Fraunhofer Gesellschaft (Hrsg.): Vision – Lösungen für maschinelles Sehen. Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V., München, 2003
- [FG06] Fraunhofer Gesellschaft (Hrsg.): URL: [http://www.ivf.fraunhofer.de/frames/german/projects/ger\\_hinderniserk.html](http://www.ivf.fraunhofer.de/frames/german/projects/ger_hinderniserk.html), 2006
- [FMN07] Fisher, Glen T.; Mérette, Pierre; Nixon, Mike: Advanced Crossing Signals - Low-Cost Warning System at Grade Crossing. Vortrag, CPCS Technologies Corporation and Transtronic Inc., 2007
- [FMR03] Freystein, Hartmut; Menge, Jürgen; Ruhs, Wilfred: Sicherheit an Bahnübergängen. In: ETR-Eisenbahntechnische Rundschau (Ausgabe), Eurailpress, 2003
- [FNT03] Fenner, Wolfgang; Naumann, Peter; Trinckauf, Jochen: Bahnsicherungstechnik. Publicis Corporate Publishing, Erlangen, 2003

- [GG05] Guthmann, Christoph; Giner, Felix: Verkehrstafelnerkennung. Diplomarbeit, Hochschule für Technik, Rapperswil, 2005
- [GH03] Grüber, Bernhard; Holz, Andrea: Verkehrsdatenerfassung aus der Luft - Vergleich der verschiedenen Fernerkundungssysteme (Optik, Infrarot, Radar). In: Internationales Verkehrswesen, Deutscher Verkehrs-Verlag, Heft 3, 2003
- [God06] Godding, Robert: Integration aktueller Kameratechnik in optischen Messsystemen. URL: <http://www.hochschule-bochum.de/fbv/photo/downloads/fachartikel.html>, Stand 2006
- [Göh02] Göhring, Daniel: Digitalkameratechnologien - Eine vergleichende Betrachtung CCD kontra CMOS. Humboldt Universität, Berlin, 2002
- [GP08a] Grimm, Matthias; Pelz, Markus: Development of an imaging based gang protection system. Vortrag, 8th World Congress on Railway Research (WCRR 2008), Seoul, 2008
- [GP08b] Grimm, Matthias; Pelz, Markus: Development of an Imaging Based Gang Protection System. In: IJR International Journal of Railway, Vol.1 (No.4), Seiten 149-156, The Korean Society for Railway, 2008
- [GPB+09] Gerlach, Katrin; Pelz, Markus; Börner, Anko; Strang, Thomas; Meyer zu Hörste, Michael; Noack, Thoralf: Geeignete Sensor- und Systemintegration als Basis für sichere und kostengünstige Bahnübergangssicherungsanlagen. Vortrag, POSNAV 2009, Dresden, 2009
- [Gut10] Gutsche, Katja: Integrierte Bewertung von Investitions- und Instandhaltungsstrategien für Bahnsicherungstechnik. Dissertation, DLR-Institut für Verkehrssystemtechnik, Braunschweig, 2010
- [Hac06] Hackstein, Tobias: Sicherungstechnische und betrieblich-organisatorische Zulassungsvoraussetzungen für Geschwindigkeitsanhebungen auf Nebenbahnen in Deutschland. Diplomarbeit, TU Dresden, 2006
- [HBK93] Hentze, Joachim; Brose, Peter; Kammel, Andreas: Unternehmungsplanung, 2. Aufl., Bern, Stuttgart, Wien, 1993
- [HBO04] Huch, Burkhard; Behme, Wolfgang; Ohlendorf, Thomas: Rechnungswesenorientiertes Controlling – Ein Leitfaden für Studium und Praxis. Physica-Verlag, Heidelberg, ISBN 3-7908-0094-5, 2004
- [Hei05] Heidl, Matthias: Anwendung einfacher Sicherungsverfahren. Vortrag, Kolloquium Sichern und Leiten auf Nebenstrecken, TU Dresden, 2005
- [Hen02] Henning, Steffen: Der Bahnübergang aus der Perspektive einer zentralisierten Betriebsführung. In: El-Eisenbahningenieur, Heft 6, 2002
- [HHM03] Hinterhuber, Hans H.; Handlbauer, Gernot; Matzler, Kurt: Kundenzufriedenheit durch Kernkompetenzen. Gabler Verlag, Wiesbaden, 2003
- [HKR+94] Herpers, R.; Kattner, H.; Rodax, H.; Sommer, G.: Verwendung von attentiven Verarbeitungsstrategien zur lokalen und globalen Bildanalyse. Kiel, 1994

- [HKT98] Handmann, Uwe; Kalinke, Thomas; Tzomakas, Christos: Videobasierte Hinderniserkennung. Internal Report 98 (4), Ruhr-Universität, Bochum, 1998
- [Hon10] Honeywell (Hrsg.): Radarsensoranlage zur automatischen Gefahrenraum-Freimeldung von Bahnübergängen. URL: [www.scheidt-bachmann.de](http://www.scheidt-bachmann.de), Produktblatt, Honeywell Regelsysteme GmbH, Maintal, 2010
- [HS08] Hiraguri, Shigeto; Sato, Kazutoshi: Current Status of Level Crossing Accidents and Solutions for Enhancing LC Safety in Japan. Vortrag, 10th World Level Crossing Symposium, Paris, 2008
- [HSE05] HSE - Health & Safety Executive (HM Railway Inspectorate) (Hrsg.): Railway Safety Principles and Guidance - Guidance on level crossings. URL: [www.hse.gov.uk](http://www.hse.gov.uk), HSE Books, 2005
- [Hul06] Hulin, Bernhard: Videobasierte Hinderniserkennung im Durchgangsraum des Stromabnehmers elektrischer Bahnen. Dissertation, TU München, 2006
- [IVA10] Institut für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik. URL: <http://www.iva.ing.tu-bs.de/levelcrossing/selcat/>. Braunschweig, Stand 2010
- [Kef09] Kefer, Volker: Strategische Ausrichtung der DB Netz AG und Auswirkungen auf die Industrieautomatisierung. Vortrag, 9. Internationaler Signal+Draht Kongress, Fulda, 2009
- [Kel02] Keller, Joachim: Rückstauverfolgung an der Verkehrssteuerungsanlage der A 81 im Bereich Grenzübergang Bietingen. Diplomarbeit, Universität Stuttgart, 2002
- [Kho07] Khoudour, Louahdi: Obstacle detection in front of automatic trains in guided transport. Vortrag, 2nd SELCAT Workshop, Marrakesch, 2007
- [Kle05] Klemp, Andreas: Entwicklung eines Stereokamerasystems zur Objekterkennung und Entfernungsbestimmung in mobilen Robotersystemen. Diplomarbeit, TU Darmstadt, Darmstadt, 2005
- [Kne09] Knewitz, Rainer: SD-Kongress: Das Topereignis 2009 für den Signal- und Leittechnikspezialisten. In: Signal+Draht, Heft 12, 2009
- [Kno07] Knollmann, Volker: UML-basierte Testfall- und Systemmodelle für die Eisenbahnleit- und -sicherungstechnik. Dissertation, TU Braunschweig, 2007
- [KR07] Klinge, Karl-Albrecht; Rachow, Ute: Risikoanalysen für Betrieb und Technik bei der Bahn. In: DeineBahn, Heft 12, 2007
- [Kru07] Kruschwitz, Lutz: Investitionsrechnung. Oldenbourg Verlag, München, 2007
- [KTC09] Kapsch Traffic Com: Intelligenz erkennt man an den Augen - Der neue Smart Traffic Sensor. URL: [www.kapsch.net](http://www.kapsch.net), 2009
- [Lam08] Lamp, Magnus: Innovationspolitische Entwicklungen im Verkehrssektor. Vortrag, Kommunikation und Mobilität - Mobilitätssysteme und Dienste mit Zukunft, Alcatel-Lucent Stiftung, Berlin, 2008



- [Lan05] Langer, Sebastian: Untersuchungen zur Fahrzeugzählung in digitalen Bildfolgen durch Bewegungstereo. Diplomarbeit, TU Dresden, 2005
- [Lau08] Laumen, Heinz: Der Bahnübergang im Spannungsfeld zwischen Sicherheit und Kosten. Vortrag, DLR-Workshop: Effiziente Nutzung regionaler Eisenbahninfrastruktur, Braunschweig, 2008
- [Lau09] Laumen, Heinz: Rahmenbedingungen bei der Migration von Anlagenteilen unter Verwendung von Standardkomponenten. Vortrag, 9. Internationaler Signal+Draht Kongress, Fulda, 2009
- [Lem09] Lemmer, Karsten: Ansätze aus der Industrieautomatisierung für die Leit- und Sicherungstechnik. Vortrag, 9. Internationaler Signal+Draht Kongress, Fulda, 2009
- [LFJ01] Leich, Andreas; Fließ, Thomas; Jentschel, Hans- Joachim: Bildverarbeitung im Straßenverkehr - Überblick über den Stand der Technik. Zwischenbericht, TU Dresden, 2001
- [LM08] Lemmer, Karsten; Meyer zu Hörste, Michael: Zusammenfassung des Workshops. Vortrag, DLR-Workshop: Effiziente Nutzung regionaler Eisenbahninfrastruktur, Braunschweig, 2008
- [LöI01] Lölkes, Peter: Einsatz von automatischen Gefahrenraum-Freimeldeanlagen an Bahnübergängen. In: EI-Eisenbahningenieur (Heft 4), Eurailpress, 2001
- [LP09] Lackhove, Christoph; Pelz, Markus: Optimizing the choice of level crossings in a technical as well as economical way. EDIS, EURO-Zel 2009, Zilina, 2009
- [Man95] Mankins, John C.: Technology Readiness Levels. A White Paper, Advanced Concepts Office, Office of Space Access and Technology, NASA, 1995
- [MDD07] Machy, Caroline; Desurmont, Xavier; Delaigle, Jean-Francois: Introduction of CCTV at Level Crossings with automatic detection of potentially dangerous situations. Vortrag, 2nd SELCAT Workshop - Technology, Marrakesch, 2007
- [Men07] Menge, Jürgen: Sicherheit an Bahnübergängen – eine gemeinschaftliche Aufgabe. In: EI-Eisenbahningenieur, Heft 10, 2007
- [MFS05] Muncke, Martin; Freystein, Hartmut; Schollmeier, Peter: Handbuch - Entwerfen von Bahnanlagen. Eurailpress, Hamburg, 2005
- [MH08] Müller, Thomas; Höpken, Marc: Optimierte Fahrbahn – 3D-Erfassung des Fahrverhaltens. In: VisIT, Heft 2, Fraunhofer Gesellschaft, 2008
- [Mie06] Miene, Andrea. Bildverarbeitung 1 - vom Pixel zum Objekt. Vorlesung, Universität Bremen, 2006
- [MK05] Manz, Karl; Klinger, Karsten: Optische Technologien im Automobil. Vorlesung, Universität Karlsruhe, 2005

- [MP08a] Meyer zu Hörste, Michael; Pelz, Markus: Einrichtung und Verfahren zum Steuern einer Bahnübergangssicherungsanlage. Offenlegungsschrift, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Köln, 2008
- [MP08b] Meyer zu Hörste, Michael; Pelz, Markus: Einrichtung zum Überwachen eines Bahnübergangs. Offenlegungsschrift, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Köln, 2008
- [MP09a] Meyer zu Hörste, Michael; Pelz, Markus: Vorrichtung und Verfahren zur Absicherung von Streckenabschnitten eines segmentierten Fahrweges für einen schienengebundenen Fahrzeugverband. Patentschrift, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Köln, 2009
- [MP09b] Meyer zu Hörste, Michael; Pelz, Markus: Vorrichtung und Verfahren zur Erkennung einer Kollisionsgefahr von schienengebundenen Fahrzeugverbänden. Patentschrift, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Köln, 2009
- [MPB08] Meyer zu Hörste, Michael; Pelz, Markus; Börner, Anko: Einrichtung und Verfahren zum Erkennen des Zugschlusses eines schienengebundenen Fahrzeuges oder eines schienengebundenen Fahrzeugverbandes. Offenlegungsschrift, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Köln, 2008
- [Mro02] Mrochen, Bernhard: Zugselbstabfertigung durch den Triebwagenführer bei der Hamburger S-Bahn. In: Signal+Draht, Heft 4, 2002
- [Mro05] Mrochen, Bernhard: Zugschlussfeststellung mit TV-Anlagen. In: Signal+Draht, Eurailpress, Heft 3, 2005
- [Obr09] Obrenovic, Miroslav: Methodik für die Migration von Systemen der Eisenbahnleit- und -sicherungstechnik am Beispiel der Einführung von ETCS. Dissertation, DLR-Institut für Verkehrssystemtechnik, Braunschweig, 2009
- [Oht05] Ohta, Masaru: Level Crossings Obstacle Detection System Using Stereo Cameras. In: Quarterly Report of Railway Technical Research Institute (RTRI, Vol. 46, No. 2), 2005
- [Öör05] Öörni, Risto: Development of in-vehicle warning device for railway level crossings. Vortrag, 18th ICTCT Workshop, Helsinki, 2005
- [Pac02] Pacht, Jörn: Systemtechnik des Schienenverkehrs. B. G.Teubner Verlag, 4. Auflage, Wiesbaden, 2004
- [Pai07] Paintner, Michael: Alles im Blick - Fahrerassistenz- und Sicherheitsfunktionen mit einer 3D-PMD-Kamera. In: AutomobilKONSTRUKTION, Heft 2, 2007
- [PB10] Pintsch Bamag: URL: <http://www.pintschbamag.de/Eisenbahn-Signaltechnik.20.0.html>, 2010
- [Pel04a] Pelz, Markus: Automatisch dynamisches Fahrgastinformationssystem für Regionalnetze. Studienarbeit, TU Dresden, 2004

- [Pel04b] Pelz, Markus: Algorithmus für ein automatisch dynamisches Fahrgastinformationssystem für Regionalnetze. Diplomarbeit, TU Dresden, 2005
- [Pel06] Pelz, Markus: Lösungsansätze - Bild gebende Verfahren im Bereich der Nebenstrecken. DLR-internes Projekt, Abschlussbericht, 2006
- [PEL08] Pelz, Markus; Eickmann, Carla; Lemmer, Karsten: Innovative Sicherungstechnik mit optischen Systemen. In: El-Der Eisenbahningenieur, Jrg. 59, Heft 8, Eurailpress, 2008
- [Pel08a] Pelz, Markus: Innovative Bahnübergangstechnik mit optischen Systemen. Vortrag, DLR-Workshop: Effiziente Nutzung regionaler Eisenbahninfrastruktur, Braunschweig, 2008
- [Pel08b] Pelz, Markus: Vorbereitung Messversuch - Bild gebende Verfahren im Bereich der Nebenstrecken. DLR-internes Projekt, Abschlussbericht, 2008
- [Pel09] Pelz, Markus: Automatisierung einer Alttechnik - Möglichkeiten einer bedarfsgesteuerten Bahnübergangssicherungsanlage. Vortrag, Bund Länder Fachausschuss, Mainz, 2009
- [Pel10] Pelz, Markus: Das Automatisierungskonzept optiBÜSA - Ein DLR-Ansatz zur Ablösung der Anrufschränke "Sicherheit an Bahnübergängen - Stand und Herausforderungen", 16. Veranstaltung der Fachtagungsreihe "Entwicklungen des Sicherungswesens in Theorie und Praxis", Dresden, 2010
- [PEM07] Pelz, Markus; Eickmann, Carla; Meyer zu Hörste, Michael: Generic Operational Requirements for Video based Applications at Level Crossings. Vortrag, 2nd SELCAT Workshop - Technology, Marrakesch, 2007
- [PG09] Pelz, Markus; Grimm, Matthias: Anordnung zur Absicherung von Arbeitsstellen im Gleisbereich. Offenlegungsschrift, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Köln, 2009
- [PGM+08] Pelz, Markus; Grimm, Matthias; Meyer zu Hörste, Michael; Lemmer, Karsten: Customized techniques and operational rules to improve level crossings by means of imaging methods. Vortrag, 10th World Level Crossing Symposium (Safety and Trespass Prevention), Paris, 2008
- [Pil07] Pilz GmbH & Co. KG (Hrsg.): SafetyEYE®. Perfect 3D Protection. Produktinformation, URL: [www.pilz.com](http://www.pilz.com), 2007
- [PM09] Pelz, Markus; Meyer zu Hörste, Michael: Verfahren zum Überwachen eines höhengleichen Bahnübergangs. Patentschrift, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Köln, 2009
- [PNK07] Pfaffenholz, Jens-Andr ; Neumann, Ingo; Kutterer, Hansj rg: Entwicklung eines remote-monitoring Systems für den HDS 4500. Vortrag, 6. Oldenburger 3D-Tage 2007, Oldenburg, 2007
- [PSM07] Pelz, Markus; Schwartz, Stefanie; Meyer zu Hörste, Michael: Model of Safety Layers in the Railway System - MoSiS. In: EURNEX - Zel 2007 EDIS  ilina, Seiten 85-92,  ilina, 2007

- [RDS09] Reliable Data Systems International Ltd: Video Train Positioning System. Produktblatt, URL: [www.rdsintl.com](http://www.rdsintl.com), Großbritannien, 2009
- [Rea97] Reason, James T.: Managing the Risks of Organizational Accidents. Ashgate Publishing, 1st edition, 1997
- [Rei01] Reiche, Jürgen: Sicherheit an Bahnübergängen. In: El-Eisenbahningenieur, Heft 10, 2001
- [Reu07] Reulke, Ralf: Stereo-Bildverarbeitung, Computervision. Vorlesung, Humboldt-Universität, Berlin, 2007
- [RHK<sup>+</sup>07] Ringbeck, Thorsten; Hagebeuker, Bianca; Kraft, Holger; Paintner, Michael: PMD-basierte 3D-Optosensoren zur Fahrzeugumfelderfassung. Vortrag, Sensoren im Automobil, München, 2007
- [Ruh06] Ruhs, Wilfred: Sicherheitsaspekte bei Strassenbauarbeiten im Bereich von Bahnübergängen. In: Tiefbau, Heft 7, 2006
- [SB83] Scheidt & Bachmann GmbH (Hrsg.): Selbstbedienungsschranke. Internes Dokument der Firma Scheidt & Bachmann GmbH, 1983
- [SB99] Scheidt & Bachmann GmbH (Hrsg.): Montagehinweis Signallaterne SSB 200, aus: Schulungsunterlagen BUES 2000. Internes Dokument der Firma Scheidt & Bachmann GmbH, 1999
- [SB10] Scheidt & Bachmann GmbH: URL: <http://www.scheidt-bachmann.de/content/blogcategory/160/245/>, 2010
- [Sch99] Schnieder, Eckehard: Methoden der Automatisierung. Vieweg – Verlag, 1999
- [Sch00] Schnippe, Christian: Psychologische Aspekte der Kundenorientierung – Die Kundenzufriedenheit mit der Qualität von Dienstleistungsinteraktionen am Beispiel des ÖPNV. Lang Verlag, Frankfurt am Main, 2000
- [Sch03] Schneberger, Marc: Spezifikation und Einsatz eines Stereokamerasystems zur videobasierten Patientenpositionierung in der Präzisionsstrahlentherapie. Dissertation, Ruprecht-Karl-Universität, Heidelberg, 2003
- [Sch07a] Schnieder, Eckehard: Verkehrsleittechnik - Automatisierung des Straßen- und Schienenverkehrs. Springer-Verlag, Berlin und Heidelberg, 2007
- [Sch07b] Schweizer, Andre: Entscheidungskriterien für die standardisierte Sicherung von Bahnübergängen. Vortrag, Fachtagung Sicherungsanlagen, Bern, 2007
- [Sch09a] Schöne, Eric: Sicherheit an Bahnübergängen - Straßenseitige Gestaltung von Bahnübergängen in der Praxis: Kennzeichnung und Sicherung von Bahnübergängen. In: Deine Bahn, Heft 05, 2009
- [Sch09b] Schöne, Eric: Sicherheit an Bahnübergängen - Straßenseitige Gestaltung von Bahnübergängen in der Praxis: Häufige Probleme und ihre Vermeidung. In: Deine Bahn, Heft 6, 2009

- [Sch09c] Schöne, Eric: Sicherheit an Bahnübergängen - Grundlagen der Bahnübergangssicherung am praktischen Beispiel. In: Deine Bahn, Heft 7, 2009
- [Sch09d] Schöne, Eric: Sichtflächen an Bahnübergängen. In: Deine Bahn, Heft 9, 2009
- [Sch09e] Schöne, Eric: Neue Regeln an Bahnübergängen. In: Deine Bahn, Heft 10, 2009
- [Sch10] Schöne, Eric: Ergebnisse aus Forschungsarbeiten zu Bahnübergängen. "Sicherheit an Bahnübergängen - Stand und Herausforderungen", 16. Veranstaltung der Fachtagungsreihe "Entwicklungen des Sicherungswesens in Theorie und Praxis", Dresden, 2010
- [See96] Seehafer, Wolfgang: Verkehrsgerechte Sicherung von Bahnübergängen. In: Eisenbahnkalender 97, Hamburg, 1996
- [SH07a] Sato, Kazutoshi; Hiraguri, Shigeto: Level Crossing Projects in Japan. Vortrag, 2nd SELCAT Workshop - Technology, Marrakesch, 2007
- [SH07b] Sato, Kazutoshi; Hiraguri, Shigeto: Level Crossing Technologies in Japan. Vortrag, 2nd SELCAT Workshop - Technology, Marrakesch, 2007
- [Sie10] Siemens AG (Hrsg.): URL: [http://www.mobility.siemens.com/mobility/de/pub/nahverkehr/schienenverkehr/bahnautomatisierung/bahn\\_uebergangstechnik.htm](http://www.mobility.siemens.com/mobility/de/pub/nahverkehr/schienenverkehr/bahnautomatisierung/bahn_uebergangstechnik.htm), Stand 2010
- [Sie69] Siemens AG (Hrsg.): Gefahrenraum-Freimelder in Lasertechnik. Siemens AG, Produktbeschreibung (internes Dokument), 1969
- [SP07] Schwartz, Stefanie; Pelz, Markus: MoSiS® - Modell der Sicherheits-Schichten im Eisenbahnsystem. Vortrag, 10. Bieleeschweig-Workshop zum Systems Engineering, Braunschweig, 2007
- [SP08] Schwartz, Stefanie; Pelz, Markus: Safety Layers at Level Crossings. Poster, 10th World Level Crossing Symposium (Safety and Trespass Prevention), Paris, 2008
- [Spi00] Spiegel (Hrsg.): Mit Laser gegen den Tod. Spiegel Online, URL: <http://www.spiegel.de/reise/aktuell/0,1518,79983,00.html>, Stand 2000
- [SRS23] ERA; UNISIG; EEIG ERTMS USERS GROUP: ERTMS/ETCS – Class 1, SystemRequirements Specification, Chapter 5, Procedures. SUBSET-026-5 – Issue 2.3.2, 17.03.2008
- [SRS30] ERA; UNISIG; EEIG ERTMS USERS GROUP: ERTMS/ETCS – Baseline 3, SystemRequirements Specification, Chapter 1, Introduction. SUBSET-026-1 - Issue 3.0.0, 23.12.2008
- [SS06] Stotz, Franz-Josef; Schäll, Markus: Bahnübergänge im Spiegel der Statistik. Bahnübergangsstatisik für das Geschäftsjahr 2006, Hrsg. DB Netz AG Produktmanagement Technik I.NVT 4 St, Frankfurt am Main, 2006

- [SS09] Smart Systems: SMART EYE - Echtzeitverkehrsdaten für Ihr Verkehrsmanagementsystem. Austrian Research Centers GmbH, URL: [www.smart-systems.at](http://www.smart-systems.at), 2009
- [SSM+07] Schöpp, Harald; Stiegler, Andreas; May, Thomas; Paintne, Michael; Massanell, Javier; Buxbaum, Bernd: 3D-PMD Kamerasysteme zur Erfassung des Fahrzeugumfelds und zur Überwachung des Fahrzeug-Innenraums. Vortrag, VDI-Tagung, Baden-Baden, 2007
- [Sta07] Statistisches Bundesamt (Hrsg.): Verkehr – Eisenbahnverkehr Betriebsdaten des Schienenverkehrs 2005. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, 2007
- [Ste02] Steinmüller, Johannes: Bildverstehen. Vorlesung (Präsentation Teil 1 und Teil2), TU Chemnitz, 2002
- [Ste07] Steinmüller, Johannes: Bildverarbeitung. Vorlesung (Skript), TU Chemnitz, 2007
- [Str06] Strampe, Carsten: Bildverarbeitung in Echtzeit. In: PRAXIS PROFILINE – Machine Vision, 2006
- [Str08] Strohschein, Uwe: Die verkehrs- und bautechnische Planung modernisierter Bahnübergänge an der Schnittstelle zu Straßen. Vortrag, Fachtagung Bahnübergänge - Straßen- und Bahnexperten an einem Tisch, Cottbus, 2008
- [SVO01] Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (Hrsg.): Straßenverkehrs-Ordnung. zuletzt geändert durch 35. ÄndVStVR vom 14. Dezember 2001
- [Tet05] Tetzlaff, Olaf: Sensordatenfusion zur Umgebungserfassung in Fahrerassistenzsystemen. Seminararbeit, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, 2005
- [Urb08] Urban, Helfried: Kamerasysteme zur Fahrwegbeobachtung. In: ETR-Eisenbahntechnische Rundschau, Eurailpress, Heft 4, 2008
- [URL03] URL: [http://ig-sinntalbahnhof.gmxhome.de/html/body\\_geschichte.html](http://ig-sinntalbahnhof.gmxhome.de/html/body_geschichte.html). Die Geschichte der Sinntalbahnhof Jossa – Wildflecken, Stand 2003
- [URL06] URL: <http://mehrbahnen.de/dateien/rhein-rueckbauplan.pdf>. Letztes Update 2006
- [URL11] URL: Glossary of Telecommunication Terms. <http://www.its.bldrdoc.gov/fs-1037>. Erstmals publiziert 1996, 2011
- [UST06] USA Signal Technology (Hrsg.): Railroad Crossing Surveillance & Trespass Detection System. Confidential Information, 2006
- [VG02] Voss, Frithjof; Grüber, Bernhard: Machbarkeitsuntersuchung für die Nutzung luftgestützter Systeme für ein flächendeckendes und echtzeitfähiges Verkehrsmonitoring. URL: [http://www.bmwgroup.com/bmwgroup\\_prod/publikationen/d/2002/pdf/Verkehrslageerfassung\\_aus\\_der\\_Luft\\_2002.pdf](http://www.bmwgroup.com/bmwgroup_prod/publikationen/d/2002/pdf/Verkehrslageerfassung_aus_der_Luft_2002.pdf), Berlin, 2002

- [VÖV09] Verband öffentlicher Verkehr (Hrsg.): Kompendium Sicherungsanlagen Teil II 11. Bahnübergänge. VöV Arbeitsgruppe Bahnübergänge, Schweiz, 2009
- [Wat08] Wattenberg, Sebastian: Vergleich einer klassischen Anrufschranke mit einer automatisierten bedarfsgerechten Schrankenanlage hinsichtlich einer betrieblichen und wirtschaftlichen Nutzenbewertung. Diplomarbeit, TU Braunschweig, 2008
- [Wes10] Wester, Klaus: BÜ-Planungen aus Sicht der Aufsichtsbehörde. "Sicherheit an Bahnübergängen - Stand und Herausforderungen", 16. Veranstaltung der Fachtagungsreihe "Entwicklungen des Sicherungswesens in Theorie und Praxis", Dresden, 2010
- [Wik10] Wikipedia: Anerkannte Regeln der Technik. URL: [http://de.wikipedia.org/wiki/Anerkannte\\_Regeln\\_der\\_Technik](http://de.wikipedia.org/wiki/Anerkannte_Regeln_der_Technik), 2010
- [Win06] Winter, Harald: Kamerabasierte Sensorik für Fahrerassistenzsysteme. Vortrag, 3rd Leibniz Conference of Advanced Science - SENSORSYSTEME, Lichtenwalde, 2006
- [Win09] Winter, Harald: Kerasensorik für Fahrerassistenz- und Sicherheitssysteme. Vortrag, Braunschweiger Verkehrskolloquium, Braunschweig, 2009
- [Wit03] Wittig, Alexander: Bewegliche Fahrwegelemente und Bahnübergangssicherung. Studienheft, Private Fernfachhochschule Darmstadt, Darmstadt, 2003
- [Wit07] Wittenberg, Klaus-Dieter: Rechtsgrundlagen und Verfahren bei der Auflasung von Bahnübergängen. In: EI – Eisenbahningenieur, Heft 8, 2007
- [Zan93] Zangemeister, Christof: Erweiterte Wirtschaftlichkeitsanalyse (EWA) - Grundlagen und Leitfaden für ein „3-Stufen-Verfahren“ zur Arbeitssystembewertung. Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven, 1993
- [Zan00] Zangemeister, Christof: Erweiterte Wirtschaftlichkeitsanalyse (EWA). Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven, 2000

# Anhang

## A.1 Glossar

Im Rahmen der Arbeit werden Begriffe verwendet, die teilweise aus anderen Quellen bekannt sind und dort in einem anderen Zusammenhang verwendet werden. Folgende Begriffe werden für diese Arbeit in nachfolgend ausgeführtem Kontext verwendet:

- Bedarfsgesteuert: Unter bedarfsgesteuert wird das betriebliche Prinzip verstanden, welches u. a. die Anrufschränke kennzeichnet. Die Schranken sind in Grundstellung geschlossen und werden nur bei Bedarf, den ein Straßenverkehrsteilnehmer hervorruft, geöffnet, um nach dessen Querung wieder geschlossen zu werden.
- Bildverarbeitung: Unter Bildverarbeitung wird die automatische digitale Auswertung von bildlichen Informationen verstanden [Kle05], die an andere Systeme weitergeleitet werden. Auf Grundlage dieser Informationen werden in weiteren Arbeitsschritten Objekte extrahiert und identifiziert (vgl. [Ste02], [Ste07], [MK05], [Bör06], [Lan05]).
- Duty Cycle: Mit dem Duty Cycle wird der Zeitraum bezeichnet, in dem eine Maschine oder ein System aktiv ist bzw. Aufgaben ausführt (vgl. [URL11]).
- Kalibrierung: Um verwendbare Daten der optischen Systeme zu erhalten, müssen die Sensoren kalibriert werden (innere Orientierung). Ebenfalls muss die Messposition und Blickrichtung der Sensoren zueinander kalibriert werden (äußere Orientierung).
- Kritikalitäten: Gesamtheit der Anforderungen, die aus der spezifischen Umgebung eines Bahnübergangs an die Sicherung für diesen abgeleitet werden können. Unterschieden wird in straßenseitige und schienenseitige Kritikalitäten. Die zusammenhängende Betrachtung aller Anforderungen wird als Kritikalitäten-Mix bezeichnet.
- Optische Sensoren: Um die Bildverarbeitung betreiben zu können, werden Kameras benötigt, mit denen die Bilder aufgenommen werden können.
- Optisches System: Ein Systemverbund, bestehend aus optischen Sensoren und zusätzlichen Technologien sowie Verfahren zur Bildverarbeitung.
- Straßenverkehrsteilnehmer: Hierunter werden gleichermaßen Straßenfahrzeuge wie Fußgänger und Radfahrer verstanden. Bei einer erforderlichen Differenzierung wird dies explizit genannt.
- Schranken: Umgangssprachlich werden Schranken als Vollschränke bezeichnet, wobei jedoch zwischen Halbschränken und Schranken unterschieden.
- Video: Optisches System ohne Bildverarbeitung.



## **A.2 Gesetze, Vorschriften und Richtlinien mit Bezug zur Bahnübergangssicherung**

An dieser Stelle werden Gesetze, Vorschriften und Richtlinien mit Bezug zu Bahnübergängen aufgeführt:

- Juristische Einordnung der Bahnübergänge
  - AEG (Allgemeines Eisenbahngesetz)
  - EBO (Eisenbahn-Bau und Betriebsordnung)
  - EBOA / BOA (Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung für Anschlussbahnen)
  - EKrG (Eisenbahnkreuzungsgesetz)
  - Eisenbahngesetze der Länder
  - StVO-VwV (Verwaltungsvorschrift zur StVO)
  - StVO (Straßenverkehrsordnung)
  - BÜV-NE (Bahnübergangsvorschrift für nichtbundeseigene Eisenbahnen)
- Für die DB AG gelten im Bezug zu Bahnübergängen folgende Richtlinien:
  - Ril 301 (Signalbuch)
  - Ril 408 (Züge fahren und rangieren)
  - Ril 815 (Bahnübergangsanlagen planen und instand halten), u. a. mit der Tabelle zu den Mindestanforderungen an die Sicherung von Bahnübergängen (vgl. Tabelle A.2-1)
  - Ril 819 (Signalanlagen planen und vorhalten)
- Für die Straßenbaubehörde/n gelten:
  - RAS (Regelwerke zur Planung, zum Bau und zum Betrieb von Straßen)
  - FStrG (Bundesfernstraßengesetz)
  - Länderstraßengesetze
  - EKrG
- Für die Polizei
  - Verkehrsüberwachungsrichtlinien bzw. Erlasse der Länder
  - Unfallaufnahmerichtlinien bzw. Erlasse der Länder

Mindestanforderungen an die Sicherung von Bahnübergängen			
Verkehrsstärke/ Art des Straßenverkehrs	Hauptbahnen und Nebenbahnen mit $v_E > 80 \text{ km/h}$	Nebenbahnen mit $v_E \leq 80 \text{ km/h}$ und Nebengleise	
		mehrgleisig	1-gleisig
Art der Sicherung			
starker Verkehr	tS	tS	
mäßiger Verkehr, ausgenommen Feld- und Waldwege	tS	tS	Ü + P, sonst P + Lf (20 km/h)
mäßiger Verkehr auf Feld- und Waldwegen	tS	tS	Ü + P, sonst P + Lf (60 km/h)
schwacher Verkehr ausgenommen Feld- und Waldwege	tS	Ü	Ü, sonst P + Lf (20 km/h)
schwacher Verkehr auf Feld- und Waldwegen	tS	Ü	Ü, sonst P + Lf (60 km/h)
Fuß- und Radwege	Ü + U oder P + U	Ü oder P	
Privatübergänge ohne Öffentlichen Verkehr	bei $v_E > 140 \text{ km/h}$ : tS	Ü oder P + Lf (60 km/h) oder A + Sprechanlage oder A	
	bei $v_E \leq 140 \text{ km/h}$ : Ü + A oder A + Sprechanlage		
Privatübergänge mit Öffentlichem Verkehr in Hafen- und Industriegebieten bei schwachem und mäßigem Verkehr	tS	Ü oder A + Lf (20 km/h)	

tS = technische Sicherung; Ü = Übersicht auf die Strecke; P = Pfeifsignal der Eisenbahnfahrzeuge; Lf = Langsamfahrt, Geschwindigkeitsbeschränkung für Eisenbahnfahrzeuge; U = Umlaufsperrung; A = Abschluss, wie z.B. Tor oder Gitter

Tabelle A-1: Mindestanforderung an die Sicherung von Bahnübergängen (nach [DB08a])

## A.3 Anwendungshinweise für den BÜSA-Leitfaden

Der Benutzer des BÜSA-Leitfadens muss die grünfarbenen Felder ausfüllen, sämtliche anderen Felder sind dementsprechend verlinkt und werden automatisiert ergänzt.

Ein Vorteil des BÜSA-Leitfadens ist, dass es keinen festen Startpunkt gibt. Somit kann je nach Informationslage mit der Eintragung eines beliebigen Kriteriums (Start-Einflussgröße) begonnen werden. Hat man seinen Startpunkt gewählt und die zur Verfügung stehenden Informationen gesichtet, werden die Beziehungen bzw. Abhängigkeiten der „Start-Einflussgröße“ zu den anderen Einflussgrößen des Untersuchungsraums in die Tabelle des Leitfadens übertragen. Die Beziehungen der zur Start-Einflussgröße verknüpften weiteren Kriterien werden danach ebenso betrachtet und deren Abhängigkeiten bzw. Parameter ergänzt. Die Bewertung der Überwachungsarten hinsichtlich der einzelnen Einflussgrößen ist vorgegeben, so dass nach Eintragung der relevanten Parameter zunächst die geeigneten Sicherungs- und danach die Überwachungsarten ausgegeben werden.

Das Ende der Bearbeitung ist erreicht, wenn nur noch eine Überwachungsart verwendet werden darf oder aber alle Beziehungen (zumindest die Beziehungen, die aufgrund des eigenen Informationsstands betrachtet werden können) durchgegangen worden sind. Die verbleibende Auswahl an Überwachungsarten ist somit potentiell einsetzbar. Sind am Ende der Betrachtungen mehrere Überwachungsarten verwendbar, erfolgt eine Gegenüberstellung der wirtschaftlichen Kriterien. Die wirtschaftlichen Kriterien werden von den Überwachungsarten unterschiedlich erfüllt.

Schritte	Beschreibung der Handlung					
1	Der Bearbeiter muss die an der Strecke existenten Einflussgrößen mit Hilfe der Matrix abgleichen und zunächst die nicht beeinflussbaren Basis-Kriterien (Nr. 1 bis 12) im Feld „Auswahl“ markieren.					
2	Eintragen der beeinflussbaren Basiskriterien (Nr. 13 bis 17)					
3	Eintragen der Abhängigkeitskriterien (Zeile18 bis 20)					
4	<p>Ausgehend von den angekreuzten Einflussgrößen werden nun die Abhängigkeiten zu anderen Einflussgrößen festgestellt. Dies erfolgt durch die Markierungen der waagerecht angegebenen Einflussgrößen (Nr. 1a bis 26c:</p> <table><tr><td>Kombination nicht möglich (x)</td></tr><tr><td>Kombination prinzipiell möglich</td></tr><tr><td>Kombination erforderlich / direkte Abhängigkeit (1)</td></tr><tr><td>Änderung / Bedarf Rücksprache</td></tr><tr><td>1 bedeutet, dass hier weitergefragt werden sollte</td></tr></table>	Kombination nicht möglich (x)	Kombination prinzipiell möglich	Kombination erforderlich / direkte Abhängigkeit (1)	Änderung / Bedarf Rücksprache	1 bedeutet, dass hier weitergefragt werden sollte
Kombination nicht möglich (x)						
Kombination prinzipiell möglich						
Kombination erforderlich / direkte Abhängigkeit (1)						
Änderung / Bedarf Rücksprache						
1 bedeutet, dass hier weitergefragt werden sollte						
4 a)	An den mit grün markierten Feldern wird nun nach der Abhängigkeit geschaut und die Bedingung überprüft.					

4 b)	An den mit 1 markierten Feldern werden die möglichen Abhängigkeiten hinterfragt, die der Planer nachvollziehen muss.		
4 c)	Wenn Abhängigkeiten bestehen werden diese Dokumentiert. Anhand der Abhängigkeiten lassen sich notwendige Maßnahmen ablesen.		
4 d)	Der Planer kann anhand der Abhängigkeiten überprüfen, ob er eine andere Überwachungsart durch Veränderung der Parameter ermöglichen kann bzw. ob diese Maßnahmen sinnvoll sind.		
5	Überprüfen der möglichen Kombination der ausgewählten Einflussgrößen (Kriterien) bezogen auf die prinzipielle Realisierbarkeit.		
6	<div>Ablesen der Felder unterhalb der Überwachungsarten und Produktbildung (X (i)) der jeweiligen Überwachungsarten anhand der ausgewählten Kriterien:</div> <table><tr><td>Bewertung der Überwachungsarten</td></tr><tr><td>0 nicht möglich, 1 möglich, 2 Empfehlung</td></tr></table>	Bewertung der Überwachungsarten	0 nicht möglich, 1 möglich, 2 Empfehlung
Bewertung der Überwachungsarten			
0 nicht möglich, 1 möglich, 2 Empfehlung			
7	Identifikation des vorläufigen Ergebnisses und ablesen des Produktes X (i)		
8	Wenn eine Einflussgröße bzw. ein Kriterium geändert werden oder zusätzlich erfüllt werden soll, so ist dies eintragbar. Anhand der dann festzustellenden Abhängigkeiten lassen sich notwendige Änderungen ablesen.		
9	Die nun resultierenden Veränderungen können abgelesen werden.		
10	Wenn nach den Basis- und Abhängigkeitskriterien mehrere Überwachungsarten übrig geblieben sind, werden nun die Wirtschaftlichkeitskriterien genutzt, um eine Auswahl treffen zu können.		
11	Bei den Bewertungsgrößen werden nun die Anzahl M eingetragen und die Bedeutung Y festgelegt. Darüber hinaus wird der Nutzenfaktor n festgelegt. Dann folgt die Gewichtung g.		
12	Abhängig von Y werden die Bewertungsszenarien ausgewählt und deren Nutzen N identifiziert.		
13	<div>Mit den o. g. Werten lässt sich nun der Gesamtnutzen ablesen:</div> $G_i = X_i N_i = X_i \sum_j g_j n_{ij} M_j Y_j$		
14	Sollte durch die bisherigen Auswahlverfahren keine eindeutige Entscheidung gefällt werden, kann eine kostenoptimierte Entscheidung gefällt werden, in dem benachbarte Bahnübergänge in die Baumaßnahme eingebunden werden. Am Ende steht das Ergebnis als optimierte Baumaßnahme (Empfehlung).		
Ende	Die einzelnen Schritte bis zur Entscheidung können anhand der geführten Entscheidungen dokumentiert werden (z.B. mit einem Word-Dokument).		

Tabelle A-2: Vorgehensbeschreibung der Anwendung des BÜSA-Leitfadens

